

EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DOS USUÁRIOS NO
COMPORTAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
ESPAÇOS EDUCATIVOS.

Catalina Morales Maya



Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído

Catalina Morales Maya

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DOS USUÁRIOS NO
COMPORTAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
ESPAÇOS EDUCATIVOS.**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Dr. Martin Ordenes Mizgier

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Morales Maya, Catalina

Efeito da Distribuição dos Usuários no Comportamento da
Ventilação Natural em Espaços Educativos. / Catalina Morales
Maya ; orientador, Martin Ordenes Mizgier - Florianópolis,
SC, 2014.

169 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Ventilação Natural. 3.
Salas de Aula. 4. Formas de Agrupamento. 5. PHOENICS. I.
Ordenes Mizgier, Martin . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Catalina Morales Maya

EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DOS USUÁRIOS NO COMPORTAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM ESPAÇOS EDUCATIVOS.

Esta dissertação foi julgada e aprovada perante banca examinadora de trabalho final, outorgando ao aluno o título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído, do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Prof. Fernando Barth
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Martín Ordenes Mizgier - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eduardo González C.
Universidad del Zulia

Prof. Leonardo S. Bittencourt, PhD.
Universidade Federal de Alagoas

Florianópolis, 2014

... Aos meus pais,
minha maior fonte de
inspiração e fortaleza

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar esta oportunidade incrível e se juntar a mim em cada passo do caminho.

Aos meus pais, Gustavo e Beatriz, e minha irmã, Laura, pelo apoio incondicional, a confiança e o carinho.

A minha família, por acreditar em mim e me encorajar a cada passo.

A Carolina Bedoya Jillo. Caro, a tua companhia, fortaleza, apoio e amizade, fizeram esta trilha mais agradável, o teu apoio foi indispensável para alcançar esta meta.

Aos meus amigos, colombianos e brasileiros, pessoas que enriqueceram o caminho e me deram fortaleza com seu apoio, alegria e amizade para continuar.

Ao Brasil, país lindo, por me abrir a suas portas e se tornar o meu segundo lar.

Ao Professor Martin Ordenes, pela sua orientação e ajuda neste processo.

Ao professor Fernando Westphal, pelas críticas e sugestões apontadas na etapa da qualificação.

Ao Professor Roberto Lamberts, pelos seus ensinamentos, observações e orientações que enriqueceram o trabalho.

Ao Professor Eduardo González, professor e pessoa maravilhosa, obrigada pelos teus ensinamentos, tua ajuda foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Ao professor Leonardo Bittencourt por ter aceitado avaliar o trabalho em sua forma final.

Ao Professor Fernando Ruttkay Pereira, Chefe! obrigada pela grande competência na docência e a orientação ao longo deste processo.

Ao Professor Ader Garcia, quem orientou meus primeiros passos na pesquisa acadêmica e me encorajo para continuar com este mestrado. Obrigada por acreditar em mim e me ensinar que cada momento é uma oportunidade para aprender de algo ou de alguém.

Ao Professor Jorge Salazar, por me mostrar a sua forma maravilhosa de abordar o conhecimento.

A Andrea e Olavo, obrigada pelo carinho, a amizade e o apoio incondicional, sempre levarei vocês e a sua maravilhosa família no meu coração.

Aos meus amigos e colegas do LabCon, Muito Obrigada queridos! vocês fizeram a diferença nesta experiência de morar no

Brasil. Lê, obrigada pela amizade, a paciência e toda tua ajuda, você é um anjo!. Lú querida, você é uma amiga maravilhosa! Te levo sempre no coração. Cín, obrigada pela alegria que você inspira e por tornar cada momento numa celebração. Marcelo, obrigada pela fé e o carinho. Sil e Rapha, obrigada pela amizade e as palavras de ânimo que chegaram sempre no momento justo. Alê, muito obrigada pela parceria e tua boa disposição para ajudar-nos sempre. Naty, Cata e Rupp, obrigada pelo apoio e por sempre ter um motivo para rir.

A Lauritz, obrigada pela tua orientação nos primeiros passos deste processo, pela amizade e o carinho. Charlie obrigada pelo apoio e as conversas interessantes, sempre aprendo algo de ti! Os levo sempre no coração.

A Marcio e Renata do LABEEE, pela sua ajuda na solução de duvidas nas diferentes etapas da pesquisa.

A Mariany e Ana, pela valiosa ajuda desde a secretaria do Pós-ARQ.

À CAPES, pelo apoio econômico que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

A todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização desta dissertação.

RESUMO

A ventilação é um dos fatores que possui maior influência na sensação térmica das pessoas que habitam um espaço e pode determinar, se estas se sentem, ou não, confortáveis dentro deste. Os espaços escolares são locais que, devido à importância das atividades realizadas no seu interior, e a grande quantidade de pessoas que os usam, têm grandes requisitos neste aspecto. As Normas brasileiras e colombianas para edifícios educacionais listam requisitos específicos sobre a quantidade de área aberta em fachada, necessária nas salas de aula para cumprir este propósito, e outras informações complementares. Elas também enunciam a importância da flexibilidade destes espaços, de modo que possam conter atividades que respondem a diferentes práticas e filosofias educacionais. No interior do espaço, o corpo humano pode modificar o padrão de fluxo de ar como um obstáculo físico e como uma fonte de calor. Condições que são aumentadas, em ambientes habitados por um número considerável de pessoas, e que mudam constantemente, dependendo da maneira como estes usuários se agrupam durante suas atividades diárias. Levando em consideração a observação acima, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento do fluxo de ar de uma sala de aula hipotética, com o espaço vazio, e ocupado por 36 estudantes, organizados em diferentes formas de agrupamento. A sala de aula foi projetada, de acordo com os parâmetros alistados no Regulamento Técnico do Ministério da Educação do Brasil e na Norma Técnica Colombiana. Este trabalho foi desenvolvido através de simulação utilizando *Computational Fluid Dynamics* (CFD) no software PHOENICS, que tem um módulo específico (FLAIR) para fins arquitetônicos. A área total necessária para a ventilação, adotada das normas, está dividida em duas aberturas e localizada em duas das fachadas de espaço, obtendo-se, deste modo, três tipos diferentes de salas de aula para cada local de estudo. Os resultados são obtidos para cada ponto da sala de aula, a uma altura de 0.6m. De acordo com o valor de velocidade obtido, cada ponto do plano avaliado foi classificado em uma de 4 faixas de velocidade, faixa de velocidade baixa, faixa de velocidade média-baixa, faixa de

velocidade média ou de velocidades superiores. As avaliações realizadas permitiram concluir que com uma variação média de 14% entre o espaço vazio e ocupado, com diferentes formas de agrupamento, a ocupação, efetivamente, afeta a distribuição inicial da velocidade do ar sobre o plano de estudo, mesmo que esta, não necessariamente signifique uma redução na velocidade do vento neste.

Palavras-chaves: Ventilação Natural, Ambientes Escolares, Salas de Aula, Formas de Agrupamento, Distribuição do Fluxo do Ar, PHOENICS.

ABSTRACT

People's thermal sensation inside a room and the awareness of whether they feel comfortable or not in it, are highly influenced by ventilation. School environments, due to the importance of the activities they host and the number of people occupying them, have strict requirements in this aspect. Brazilian and Colombian standards for educational buildings give specific requirements about the amount of open façade necessary in classrooms to fulfill this purpose, and other complementary information. They also enunciate the importance of the flexibility of these spaces, in order to contain activities that respond to different educational practices and philosophies. Inside the space, the human body can modify the airflow pattern as a physical obstacle and as a heat source. Conditions that are increased in environments inhabited by a considerable number of people, and that change constantly, depending on the way these users group during their normal activities. Taking in consideration the observation above, the aim of this study is to evaluate the behavior of the air flow of a hypothetical classroom, while the space is empty and occupied with 36 individuals organized in different layouts. The classroom was design according to the parameters enlisted in the Technical Regulation of the Brazilian Education Ministry and the Colombian technical standard. This research work was developed through simulation using Computational Fluid Dynamics (CFD) on the PHOENICS software, which has a specific module (FLAIR) for architectural purposes. The total area required for ventilation, adopted from the standards, is divided into two openings and located in two of the space façades, obtaining this way, 3 different types of classrooms for each location. Velocity values were obtained for each point of the classroom, at a height of 0.6m. According to this value, each point of the evaluated plane was classified in one of 4 velocity groups, low speed, medium-low speed, medium speed or upper limit speed. The data analysis showed that with an average of 14% of the evaluation plane area that shifted from one group to another, when compare the empty and occupied classrooms, the occupation had a great influence on the modification of the initial distribution of air velocity at the studied height, not necessarily meaning a reduction in wind speed.

Key-words: Natural Ventilation, School Environments, Classrooms, Groupings, Air Flow Distribution, PHOENICS

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Traço do vento para 3 formas diferentes de distribuição dos ocupantes. Em cinza, traço do vento; e em preto, traço da areia (**fonte: CASTRO GALLEG0 et al., 2012**)..... 8
- Figura 2.** Temperatura Operativa aceitável em espaços naturalmente condicionados (**Fonte: Adaptado da ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010**)..... 23
- Figura 3.** Esquema do movimento do ar devido à diferença de pressão estática (Fonte: Adaptado de BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010) 28
- Figura 4.** Campos de pressão em um corpo aerodinâmico e um cubo (Fonte: Adaptado de Aynsley; Melbourne; Vickery, 1977 e Givoni, 1976 (apud BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010)). 29
- Figura 5.** Limitações e Realizações de acordo com a ida com a etapa cognitiva, segundo Piaget (COOK; COOK, 2005) 31
- Figura 6.** Esquema da composição dos modelos de estudo..... 46
- Figura 7.** Diagramas de Rosa dos Ventos. a). Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis – SC, *Software Analysis SOL-AR* (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, [s.d.]). b). Rosa dos Ventos para a cidade de Medellín – Colômbia, IDEAM (1999). Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis – SC, *Software Climate Consultant* (ENERGY DESIGN TOOLS - UCLA, 2012)..... 48
- Figura 8.** Mapa do Brasil com a Zona Bioclimática 3 49
- Figura 9.** Temperatura média e Umidade Relativa média para cada mês do ano, Florianópolis – SC. 50
- Figura 10.** Rosa dos Ventos Florianópolis - SC. Fonte: *Software Analisis SOL-AR* (**LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**) 51

Figura 11. Temperatura e Umidade Relativa para cada mês do ano - Medellín, Colômbia	52
Figura 12. Rosa dos Ventos Medellín, Colômbia. Fonte: (IDEAM)	53
Figura 13. Distribuição da Área de Janela em Fachada	56
Figura 14. Agrupamentos de Salas de Aula considerados	58
Figura 15. Tipos de agrupamento adotados para a avaliação do espaço	62
Figura 16. Quadro resumo dos casos base de estudo	63
Figura 17. Distribuição das faixas de velocidade no espaço, e ilustração tridimensional dos agrupamentos	72
Figura 18. Caso 1 – Florianópolis BRA_50-50 O	74
Figura 19. Caso 2 – Florianópolis BRA_50-50 A	76
Figura 20. Caso 3 - Florianópolis BRA_20-80	79
Figura 21. Fluxo de ar no espaço vazio e ocupado, com uma distribuição de aberturas em fachadas 20-80 em paredes opostas e uma velocidade inicial de 0.5m/s, considerando o aporte de calor do corpo dos usuários	81
Figura 22. Fluxo de ar no espaço vazio e ocupado, com uma distribuição de aberturas em fachadas 20-80 em paredes opostas e uma velocidade inicial de 0.5m/s, sem considerar o aporte de calor do corpo dos usuários	82
Figura 23. Caso 1 – Medellín COL_50-50 O	85
Figura 24. Caso 2 – Medellín COL_50-50 A	87
Figura 25. Caso 3 – Medellín COL_20-80	89

Figura 26. Comparação entre a soma das percentagens pertencentes às áreas do plano de estudo, com valores nas faixas de velocidade 2 e 3, para o Caso 1	93
Figura 27. Comparação das percentagens obtidas para a faixa de velocidades 4, em cada contexto, para o Caso 1.	94
Figura 28. Comparação entre a soma das percentagens pertencentes às áreas do plano de estudo, com valores nas faixas de velocidade 2 e 3, para o Caso 2	95
Figura 29. Comparação das percentagens obtidas para a faixa de velocidade 4, em cada contexto, para o Caso 2	95
Figura 30. Comparação entre a soma das percentagens pertencentes às áreas do plano de estudo, com valores nas faixas de velocidade 2 e 3, para o Caso 3	96
Figura 31. Valores médios das variações entre o caso base e o espaço ocupado, para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros Básicos de Projeto para Salas de Aula, segundo o Caderno Técnico	16
Tabela 2. Área recomendada por Aluno, segundo o Nível de Escolaridade (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999)	17
Tabela 3. Parâmetros de projeto de salas de aula, segundo a Norma NTC 4595	19
Tabela 4. Percepção do movimento do ar de acordo com a Temperatura, a Atividade, e a Sensação Térmica.....	26
Tabela 5. Classificação climática de Medellín, Colômbia, segundo Lang, Martonne, Köppen e Holdrige	52
Tabela 6. Propriedades Térmicas dos Materiais	57
Tabela 7. Cargas térmicas.....	60
Tabela 8. Coeficientes de convecção usados para o corpo humano em cada caso.....	67
Tabela 9. Abreviações adotadas na Análise dos Resultados....	70
Tabela 10. Valores médios das variações para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto, contexto brasileiro	84
Tabela 11. Valores médios das variações para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto, contexto colombiano.....	90

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
1.2 Estrutura do Trabalho	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Espaços Escolares	11
2.2 As Salas de Aula	13
2.2.1 Parâmetros para o projeto da sala de aula, segundo Caderno Técnico n. 4 (2002)	15
2.2.2 Parâmetros para o projeto de salas de aula, segundo a Norma Técnica Colombiana, NTC 4595 (1999)	17
2.3 Conforto Térmico	19
2.3.1 ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2010)	21
2.3.2 Variáveis ambientais e pessoais	24
2.3.3 Velocidade do ar e conforto térmico	24
2.3.4 Princípios físicos do movimento do ar	28
2.3.4.1 Pressão estática:	28
2.3.4.2 Pressão dinâmica:	29
2.3.4.3 Infiltração	30
2.3.5 Importância da velocidade do ar para garantir conforto térmico nas salas de aula	30
2.3.5.1 Ocupação e fluxo de ar ao interior dos espaços	35
2.3.6 Ferramentas de avaliação da ventilação natural	37
2.3.6.1 Modelos de cálculo	37
2.3.6.2 Modelos físicos	38
2.3.6.3 Modelos de simulação Computacional	39
2.4 Considerações Finais da Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica	42
3 METODOLOGIA	45
3.1 Características climáticas das cidades de referência	47
3.1.1 O Clima	47

3.1.1.1	Florianópolis – SC, Brasil	49
3.1.1.2	Medellín, Colômbia.....	51
3.2	Ferramentas de simulação	53
3.3	Procedimentos de Modelagem e Análise de Resultados 54	
3.3.1	Etapa 1: Definição do modelos de sala de aula 54	
3.3.1.1	Fase 1: Definição dos modelos para simulação 54	
3.3.1.2	Fase 2: Definição das variáveis de simulação 64	
3.3.1.3	Fase 3: Modelagem dos elementos no Software PHOENICS	64
3.3.2	Etapa 2: Processamentos dos dados e análise de resultados68	
3.3.2.1	Fase 1: Mapeamento dos valores	68
3.3.2.2	Fase 2: Determinação das faixas de velocidades para avaliação.....	68
3.3.2.3	Fase 3: Percentagem de mudança da distribuição da velocidade do ar no plano de estudo	69
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	70
4.1	Códigos e Abreviações adotados na análise de resultados 70	
4.2	Mapeamento dos valores de velocidade nas 4 faixas de velocidade.....	71
4.2.1	Contexto brasileiro	73
4.2.2	Contexto colombiano	84
4.2.3	Diferenças produzidas pelos parâmetros de projeto definidos pelo contexto	92
4.2.4	Considerações finais sobre os resultados	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
5.1	Conclusões.....	101
5.1.1	Sobre a metodologia de estudo	101
5.1.2	Sobre os resultados deste estudo	102
5.2	Limitações do Trabalho	103
5.3	Recomendações para trabalhos futuros.....	105
6	Bibliografia e Referencias	107

Anexo 1: Tabelas de cálculo da temperatura interior 115

Anexo 2: Fluxo De Ar no Espaço Vazio e Ocupado, com uma Distribuição de Aberturas em Fachadas 50-50, para o contexto brasileiro, com uma Velocidade Inicial de 0.5m/s, considerando o Aporte de Calor do Corpo dos Usuários..... 127

Anexo 3: aplicação da ASHRAE Standard 140 (Bestest) como Ferramenta de Validação de códigos CFD 131

1 INTRODUÇÃO

As razões para ventilar um espaço são diversas, sendo que algumas delas são de ordem técnica, e outras, de ordem sensorial. Ainda que estas razões sejam numerosas, podem ser resumidas em três finalidades básicas.

A ventilação higiênica, como é denominada em alguns textos, corresponde à primeira finalidade. Esta busca manter um bom nível de oxigênio no interior do espaço, permitindo que o volume de ar do espaço se renove periodicamente, removendo o ar abafado e cheio de gases que podem ser nocivos para a saúde dos usuários.

A segunda finalidade é resfriar o edifício propriamente dito, retirando a carga térmica absorvida pelas construções em decorrência da exposição do edifício à radiação solar, assim como dos ganhos térmicos produzidos no interior” (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010).

Finalmente, a última finalidade da ventilação é assegurar uma sensação térmica satisfatória segundo o contexto, para as pessoas que habitam o espaço.

Se bem que “o movimento do ar não modifica a temperatura [...] provoca uma sensação de frescor, devido à perda de calor por convecção e aumento da evaporação do corpo” (GUIMARÃES-MERÇON, 2008, p. 13).

Esta movimentação do ar pode ser benéfica ou prejudicial, de acordo com o ambiente avaliado. No caso dos espaços localizados em climas quente-úmidos ou com verões com estas características, este fenômeno quase sempre é desejado (CÂNDIDO et al., 2010; TOFTUM, 2004), e pode ser uma estratégia útil para projetistas e arquitetos a fim de melhorar a sensação térmica em espaços que não têm ar-condicionado.

Além das finalidades técnicas e/ou sensoriais, existem outras razões de caráter ambiental e econômico para justificar a importância da ventilação natural: o consumo energético das

edificações e o alto impacto ambiental gerado pela atividade humana, que são problemas relativamente novos, porém, sobre nenhuma circunstância, menos importantes. A degradação ambiental que apresenta o planeta Terra, depois de milhares de anos de abuso, é atualmente uma prioridade.

Após a Segunda Guerra Mundial e até poucos anos atrás, o condicionamento mecânico de ar consolidou-se como uma potente ferramenta de projeto, e um símbolo de status social, pois não era acessível para toda a população, devido a seu alto custo.

Na atualidade, o alto impacto ambiental e os altos custos de instalação, manutenção e uso dos sistemas de ar-condicionado, poderiam fazer da implementação deste sistema um erro, se utilizado em áreas onde seu uso não seja realmente necessário.

Yik e Lun (2010), em um estudo feito, em um conjunto de habitação social, na cidade de Hong Kong, encontraram que o uso da ventilação natural pode reduzir o consumo de energia destinado a equipamentos de refrigeração e condicionamento de ar, em até, aproximadamente, 24%, segundo as simulações feitas no desenvolvimento da pesquisa.

Assim, a ventilação natural, por meio do aproveitamento do vento, recurso natural e renovável, mostra seu valor como ferramenta arquitetônica, pois além dos já citados benefícios para a saúde e conforto dos usuários, ajuda a diminuir o consumo energético das edificações e, conseqüentemente, diminui seu impacto ambiental.

No campo humano, estão os usuários. A ventilação é um dos fatores de maior impacto na qualidade ambiental de um espaço interno. Uma exposição excessiva às correntes de ar ou a inexistência destas, pode determinar se um indivíduo se sente confortável ou desconfortável nos espaços que habita. García e Fuentes (1995) ressaltam que “conseguir bem-estar físico e psicológico é o objetivo primordial ao se projetar e construir qualquer espaço”. Espaços com problemas de superaquecimento, umidade, concentração de odores, entre outros, são espaços que, em maior ou menor medida, afetam o bem-estar de seus usuários.

Cada tipo de espaço, leva com ele diferentes requerimentos e exigências relacionadas

com o conforto térmico de seus usuários. Alguns, devido à atividade que contém, não precisam de grandes gestos para garantir o conforto térmico, pois estas atividades podem ser passageiras e de curta duração (MORALES; ORDENES, 2013, p. 2).

Outros espaços, pelo contrário, devido à quantidade de pessoas que os habitam ou ao tipo de atividade realizada dentro deles, requerem maiores cuidados em seu comportamento térmico. Do mesmo modo, ambos os casos, têm necessidades de ventilação diferenciadas.

Segundo a ASHRAE Standards 62, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Analysis and Recommendations* (2001), os requerimentos de quantidade de ar exterior, necessários para obter uma ventilação propícia dos espaços interiores ocupados, podem ser expressos em litro por segundo, por pessoa ($L/s \cdot Pessoa$) ou litros por segundo, por metro quadrado (L/sm^2). Espaços como os corredores, espaços de transição e de não permanência, têm um requerimento de $0.25 L/sm^2$. Já, espaços com uma maior densidade de ocupação e um maior tempo de permanência, como uma sala de aula ou um auditório, necessitam de, pelo menos, $8 L/s \cdot Pessoa$.

A sala de aula, por exemplo, é um lugar com características muito particulares. Dentro das mais importantes encontram-se as características específicas dos seus usuários. Este tipo de espaço é um dos poucos que é usado por pessoas de todas as idades, desde crianças nas creches até os adultos na universidade ou em cursos extracurriculares, e é o único que tem um usuário múltiplo homogêneo. Homogêneo, não por serem todos iguais, mas sim, devido à diferença de outros estabelecimentos, como escritórios ou casas, as salas de aula são os únicos espaços habitados por vários usuários que pertencem ao mesmo grupo etário e estão no mesmo período de desenvolvimento. Mesmo levando em consideração, somente a população em idade escolar, as estatísticas evidenciam que grande parte da população seria beneficiada com o bom desempenho das variáveis ambientais e espaciais dentro deste tipo de espaço.

De acordo com a organização *Todos pela Educação*, no ano de 2010, no Brasil 45.364.276 pessoas tinham entre 4 e 17

anos (TODOS PELA EDUCAÇÃO, 2010). Assim, aproximadamente 24% da população brasileira encontrava-se em idade escolar, especificamente nos níveis de ensino fundamental e médio.

No caso colombiano, segundo o DANE (2011), aproximadamente 10.115.101 pessoas estavam matriculadas nos mesmos níveis de escolaridade, sendo equivalente a 22% da população total nacional. Estas percentagens são representativas, ainda mais levando em consideração que os dados acima não incluem nem as populações do ensino infantil, nem superior.

Por outro lado, os estudos de conforto térmico tradicionais, usualmente, avaliam um espaço, e como este e suas condições ambientais interiores e exteriores afetam os usuários. No entanto, um espaço na etapa de projeto pode parecer apropriadamente ventilado, mas em muitas ocasiões, as ações humanas criam barreiras físicas que descompensam o ambiente projetado. Como tem sido demonstrado em estudos de ventilação em uma escala maior, como a urbana, embora as velocidades e direções predominantes do vento sejam conhecidas, as vizinhanças e o contexto no qual o projeto será localizado possui um grande impacto nessas variáveis. Bittencourt e Cândido (2010), ressaltam que a configuração, a forma e a tipologia do conjunto edificado, têm uma grande influência no comportamento do fluxo do ar.

Da mesma forma, mas em uma escala menor, a maneira como se distribuem os móveis e equipamentos, inclusive, a maneira como se distribuem os estudantes, na sala de aula, ou como se agrupam para conversar em intervalos, entre uma aula e outra, fazem com que seus próprios corpos modifiquem o comportamento da ventilação interna, mitigando as correntes que circulam no interior ou, inclusive, privando algum de seus colegas de uma brisa refrescante em um dia de calor.

“A compressão do espaço escolar” afirma Antonio Viñao (2008), requer que seja contemplado como uma representação teatral, onde são dispostos e deslocam-se pessoas, móveis e objetos de uma forma ou outra, segundo os tempos, as atividades, e

no caso das salas de aula, os métodos de ensino (VIÑAO, 2008, p. 17).

Uma representação teatral como o autor a chama, altamente complexa. Este tipo de espaço é desejado, enquanto a sua concepção e planejamento, prescrito, pois é pautado e legislado, real, pois é um espaço físico, e vivenciado, já que é percebido de maneira subjetiva, pelos que o habitam, e é onde “confluem a Arquitetura e a Pedagogia” (VIÑAO, 2008).

O Ministério da Educação Brasileiro define que,

A educação abrange os processos formativos que se desenvolvem na vida familiar, na convivência humana, no trabalho, nas instituições de ensino e pesquisa, nos movimentos sociais e organizações da sociedade civil e nas manifestações culturais (CONGRESSO NACIONAL, 1996, p. 1).

E sua finalidade é “o pleno desenvolvimento do educando, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho”.

O Ministério da Educação Nacional Colombiano (MEN) em concordância com a definição anterior, a define como “um processo de formação permanente, pessoal, cultural e social que se fundamenta em uma concepção integral da pessoa humana, de sua dignidade, de seus direitos e deveres” (CONGRESO DE COLOMBIA, 1994).

Estas definições foram extraídas da Lei n. 9394 - Lei de Diretrizes e Bases da Educação Brasileira (1996), e da Ley 115 – Ley General de Educación Colombiana. Apesar de serem as leis encarregadas de orientar os processos pedagógicos e os espaços onde se oferecem estes, estas leis não fazem referência, em nenhum de seus artigos, à planta física de espaços pedagógicos, incluindo os parâmetros de projeto que definem as áreas mínimas requeridas para a ventilação dos espaços. Assim, parece indicar que o processo de formação e o espaço no qual este processo é realizado, desde a norma, é concebido de duas maneiras diferentes, separadas e isoladas uma da outra. Fenômeno observado também por outros pesquisadores na vida profissional e o processo de projeto (AZEVEDO, 2002).

A relação espaço-usuário, e poderia agregar-se aí, atividade, é de grande importância ao se projetar qualquer espaço. No entanto, esta relação incrementa ainda mais sua importância como parâmetro fundamental no processo de criação ou adequação do edifício escolar, além da proposta pedagógica adotada pela Instituição. Devido ao fato de que tanto as regulamentações quanto os profissionais, separam os três componentes, as dinâmicas envolvidas nessa relação são desconhecidas por aqueles encarregados de projetar o espaço, resultando em projetos que não oferecem soluções espaciais satisfatórias para as propostas pedagógicas, e dentro destas, as atividades que vão ser realizadas no interior deste tipo de prédios.

Este desconhecimento das dinâmicas vem de ambos os lados, tanto dos arquitetos, como dos pedagogos, profissionais envolvidos nas disciplinas que confluem no espaço escolar. Segundo Azevedo (2002), os arquitetos tratam o projeto como uma atividade intuitiva, considerando possuírem o saber e a autonomia suficientes para resolver o problema espacial, e por sua vez, os educadores e pedagogos, raramente incluem o prédio escolar em sua proposta pedagógica.

Dessa forma, a produção de uma arquitetura escolar de qualidade, vai depender do nível de adequação e desempenho dos ambientes – verificando aspectos ambientais, de ordem técnica, funcional e estética – e, conseqüentemente, como esses aspectos afetam o bem-estar do usuário (AZEVEDO, 2002).

No entanto, aprofundando na relação espaço-usuário-atividade, é importante reconhecer que o usuário de um espaço, neste caso, o aluno, não pode ser considerado como um elemento imóvel dentro deste, que somente tem um volume e um fornecimento calórico. Ainda que implique maior trabalho na etapa de projeto e concepção do espaço, é de vital importância compreender que esse usuário, que efetivamente possui um volume e fornece seu próprio calor para o espaço, é móvel, e se movimenta, como resposta às atividades desenvolvidas, e interage ao mesmo tempo com os fenômenos naturais contidos no espaço.

Esses fenômenos ambientais – como a ventilação - são fatores essenciais, para determinar, quão confortável, ou não, encontra-se um usuário, realizando a sua atividade dentro de um espaço. Porém, essa relação pode ser avaliada de outra perspectiva. A relação usuário–fenômeno é uma relação bidirecional. Usualmente, os arquitetos e engenheiros planejam cuidadosamente o comportamento dos espaços, aplicando diferentes estratégias que visam gerar espaços confortáveis para os usuários. Mas é comum que seja desconsiderado o impacto que podem ter esses usuários no desempenho desse espaço.

Os espaços de alta densidade, como as salas de aula, espaço escolar por excelência, possuem, além de uma grande quantidade de carga térmica gerada pelos usuários ao espaço, uma grande quantidade de corpos movimentando-se no seu interior. Além disso, os documentos desenvolvidos pelos Ministérios da Educação do Brasil e da Colômbia, que guiam o projeto de espaços escolares em cada país, ressaltam a importância de soluções arquitetônicas que permitam a criação de opções para diferentes práticas pedagógicas (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO; FUNDESCOLA, 2002a; MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999).

Castro Gallego et al. (2013), mediante um estudo qualitativo demonstraram que as formas de agrupamento, têm, efetivamente, um impacto na distribuição do ar no interior das salas de aula, e que de fato, uma forma de agrupamento produz uma distribuição do fluxo diferente de outra, na qual a mesma quantidade de pessoas está agrupada, de forma diferente. Este estudo foi feito, avaliando o fenômeno por meio de um modelo do espaço - a sala de aula de uma creche - em escala reduzida dentro de um túnel de vento, usando fumaça e areia de sílica como marcador da corrente de ar. A figura 1 apresenta o esquema do traço do vento para 3 formas diferentes de distribuição dos ocupantes.

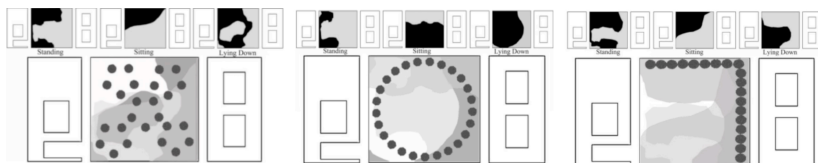


Figura 1. Traço do vento para 3 formas diferentes de distribuição dos ocupantes. Em cinza, traço do vento; e em preto, traço da areia (**fonte: CASTRO GALLEGO et al., 2012**)

A comparação do comportamento de um fenômeno ou fator natural, como o vento, dentro de um espaço vazio, com o comportamento do mesmo fator, mas com o espaço em estado de ocupação, parece evidenciar uma alteração no comportamento da variável ambiental. Esta variação pode parecer óbvia para alguns, no entanto, esta, ainda, não foi quantificada em índices ou traduzida em recomendações arquitetônicas, que possam ser usadas por arquitetos e profissionais durante o exercício de projetar o espaço.

O estudo proposto para esta dissertação, busca verificar de que forma as condições ambientais interiores de um espaço que foi projetado, aproveitando os recursos ambientais locais, neste caso, o fluxo do ar, são afetadas, quando o espaço é ocupado de diferentes formas.

Fazer este tipo de consideração é importante em todas as zonas climáticas, especialmente, nos contextos que foram escolhidos para fazer as avaliações propostas por este estudo, e outros com condições semelhantes. Florianópolis – SC possui condições no Verão de altas temperaturas e umidades relativas, e Medellín, Colômbia, é uma cidade que durante todo o ano, apresenta um clima quente e úmido. Nestes contextos, a sensação térmica é uma das principais causas de desconforto.

Um estudo que combina as variáveis de espaço, fenômeno ambiental, usuário e atividade, é um meio importante para gerar recomendações e observações que ajudem os profissionais a projetar estes espaços, mas também, pode inspirar outros pesquisadores a estudar as necessidades específicas de outros lugares, usuários e grupos etários, desde este ou outro dos fenômenos naturais que modificam o ambiente interno.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as variações na distribuição interna do fluxo de ar, produzidas por agrupamentos comuns de estudantes, dentro de salas de aula, de centros de Ensino Fundamental.

1.1.2 Objetivos Específicos

- * Identificar a partir de normativas locais e especificações técnicas os parâmetros mas representativos que permitem definir um caso base para o estudo

- * Determinar a distribuição do fluxo de ar (velocidade) em cada ponto do espaço, nos casos base de estudo, com o espaço em estado de desocupação, e em várias formas de ocupação.

- * Determinar a percentagem de variação da distribuição da velocidade do fluxo de ar entre as diferentes formas de ocupação do espaço.

- * Analisar a diferença total da distribuição da velocidade do fluxo do ar, entre o espaço vazio e ocupado com diferentes formas de agrupamento, produzidos pelos diferentes parâmetros de projeto aplicados.

- * Analisar as diferenças da distribuição da velocidade do fluxo do ar, produzidas pelos valores dos parâmetros de projeto definidos pelas normas de cada contexto avaliado.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução, apresentando justificativa, problemática e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo contém a fundamentação teórica, incluindo alguns conceitos básicos da ventilação natural e os princípios do movimento do ar, o conforto térmico e os espaços educativos e seus usuários,

considerando alguns estudos feitos sobre cada um dos temas e várias aplicações, conjugando vários deles. O terceiro corresponde à metodologia, momento em que são explicados os procedimentos que serão adotados para alcançar os objetivos desta pesquisa. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos durante este estudo. Finalmente, o quinto capítulo, contém as considerações finais, as conclusões sobre a pesquisa e a metodologia proposta, as limitações do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESPAÇOS ESCOLARES

O espaço escolar é aquele que foi criado, condicionado ou habilitado para conter atividades de aprendizagem e ensino, “não é um recipiente vazio e neutro, vazio de significados e conteúdo. Socializa e Educa” (VIÑAO, 2008). Em outras palavras, é um agente ativo dentro dos processos que abriga no seu interior. É o primeiro lugar, além do lar, onde as crianças são inseridas em uma experiência coletiva, permitindo que esta tenha interação com outros e com o ambiente construído no qual habita, desenvolvendo assim, uma das habilidades mais importantes na sua vida adulta, a socialização (AZEVEDO, 2002).

Estes tipos de espaços são particulares, com atividades, horários e dinâmicas muito específicas (VIÑAO, 2008), que possuem grande densidade ocupacional durante seus períodos de uso, e que podem ser aproveitados por quase toda a população, desde as crianças em creches até os adultos em cursos de educação superior ou extracurriculares.

As escolas, segundo Azevedo (2002), além de terem um papel de grande relevância nos processos educativos dos futuros cidadãos, possuem um grande significado para as comunidades, pois são edificações emblemáticas e representativas para elas. Elas, da mesma forma que a atividade que contêm, tendem a configurar-se como espaços sociais autônomos e independentes, destinados ao ensino e à educação, e desta forma, adquirem uma estética, uma função e uma identidade visual que os fazem reconhecíveis dentro do seu contexto espacial, social e cultural.

De acordo com a National Sleep Foundation, no início da idade escolar - aproximadamente aos 3 anos - a necessidade de sono e descanso do estudante é de 11 a 13 horas diárias, o que é equivalente a 54% das 24 horas do dia. Esta necessidade vai diminuindo com o tempo, sendo necessárias na idade adulta, um total de 7 a 9 horas diárias de sono. Descontando esta quantidade de tempo de descanso dos alunos, estes têm, então, entre 11 e 17 horas ativas no dia. Desse período de tempo de atividade, eles se encontram dentro dos espaços escolares, por

aproximadamente 8 horas. Os prédios escolares então, em períodos tão prolongados de tempo, além de oferecer a atividade principal para a qual foram criados, a educação, devem suprir a maioria das necessidades básicas dos usuários. Por esta razão, estão compostos por várias tipologias de espaços, em que possam efetuar-se atividades de alimentação, recreação e serviços básicos de saúde e higiene.

No caso brasileiro, o Caderno Técnico n. 4 “Espaços Educativos - Subsídios para Elaboração de Projetos e Adequação de Edificações Escolares” (2002), desenvolvido pelo Ministério da Educação, por intermédio da Coordenação de Projetos e Instalações Escolares – FUNDESCOLA, classifica os espaços contidos nos prédios escolares como Ambientes de Ensino e Docência (ED), Suporte Pedagógico (SP), Recursos Didáticos (RD), Administração (AD), Alimentação (AL) ou Serviços Gerais (SG).

Os parâmetros básicos espaciais e ambientais de cada tipo de espaço e suas subdivisões são numerados dentro do Volume 2 deste Caderno Técnico, em forma de Tabelas, e as salas de aula, objeto deste estudo, estão contidas dentro da Tipologia de Ambientes de Ensino e Docência (ED), na subdivisão de Sala de Aula (ED-01/U).

No caso Colombiano, a Norma NTC 4595, “Ingeniería civil y Arquitectura. Planeamiento y Diseño de Instalaciones y ambientes Escolares” (1999), documento desenvolvido pelo Ministério de Educação Nacional da República da Colômbia, é a encarregada de orientar o projeto de espaços escolares. Esta classifica os espaços contidos nas instalações escolares em dois grupos, os Ambientes Pedagógicos Básicos e os Ambientes Pedagógicos Complementários. Por sua vez, estes são divididos em subgrupos. As salas de aula pertencem ao grupo geral de Ambientes Pedagógicos Básicos e ao subgrupo “Ambiente tipo A”. O nome oferecido pela norma não é em si muito revelador, por isso ela oferece a seguinte definição: “Lugares nos quais é possível fazer trabalhos individuais, em pequenos grupos, “*Cara a Cara*” (2 a 6 pessoas) e em Grupos de até 50 pessoas, tanto “*Cara a Cara*” como em disposição frontal” (MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999); a norma também especifica que este tipo de espaço não tem necessidade de instalações técnicas, equipamentos e características ambientais de grande complexidade.

2.2 AS SALAS DE AULA

As salas de aula são o tipo de espaço encontrado em maior quantidade nos prédios escolares, pois é o principal local do desenvolvimento das atividades curriculares de ensino. De acordo com o Caderno Técnico n. 4 (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO; FUNDESCOLA, 2002b), a solução arquitetônica deste tipo de espaço deve permitir diversas formas de arranjo dos mobiliários, que promovam a disposição dos alunos em diversas formas de agrupamento, criando opções de práticas pedagógicas.

Azevedo (2002), ressalta que, apesar do contexto globalizado no qual está inserido o mundo atual, e os novos tópicos discutidos dentro da sala de aula, os alunos ainda convivem em espaços projetados há mais de cem anos, com a disposição clássica em filas, favorecendo o ensino puramente expositivo.

A NTC 4595 (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999), por outro lado, faz referência a esse processo de mudança, e como é indispensável projetar ambientes variados que favoreçam, tanto o trabalho individual como o trabalho e a discussão em grupos. O dia a dia escolar passa do discurso da cadeira à dinâmica do ateliê, do seminário e da investigação.

Dentro das tabelas que contêm os parâmetros de projeto dos espaços educativos, fornecidas pelo Caderno Técnico n. 4, no contexto brasileiro, na seção de observações, é ressaltada a importância dessa pluralidade do espaço, e a NTC 4595, norma Colombiana, esclarece que os parâmetros definidos dentro dela, não só levam em conta as tipologias de salas convencionais, mas permitem a geração de novos lugares concebidos para tendências pedagógicas e formas de gestão escolar diferentes (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO; FUNDESCOLA, 2002a; MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999).

No presente trabalho, as diferentes opções de práticas pedagógicas e as teorias e processos de aprendizagem são considerados como agentes que exigem a movimentação dos usuários no interior das salas de aula, mas seu estudo não faz parte do escopo deste trabalho, razão pela qual serão levadas em consideração, mas não se considerará nenhuma delas como parâmetro ou limitante de avaliação do espaço.

Por outro lado, as razões ou necessidades de ventilar as salas de aula enquadram-se dentro das necessidades básicas de ventilação da maioria dos espaços. Porém, devido à atividade realizada, e à grande quantidade de pessoas que as realizam, simultaneamente, a importância de suprir essas necessidades aumenta.

De acordo com vários documentos (DEPARTMENT FOR EDUCATION, 2006; EPA, 2003), a IAQ, *Interior Air Quality*, em Português, Qualidade do Ar Interior, é definida como o indicador chave do desempenho da ventilação em ambientes interiores.

O dióxido de carbono (CO_2) é um dos poluentes mais comuns em ambientes internos, lugares nos quais, a maioria das pessoas, passam, aproximadamente, 90% do tempo (DEPARTMENT FOR EDUCATION, 2006). Pequenas concentrações deste elemento no ar, não são nocivas para a saúde das pessoas, mas uma renovação do ar insuficiente, produto de uma inadequada ventilação do espaço, pode permitir sua acumulação no espaço. Baixas taxas de renovação do ar, aumentam a concentração de dióxido de carbono no ambiente e, em consequência, diminui a capacidade de concentração dos usuários.

Segundo a EPA (2003), uma baixa qualidade do ar interior, reduz a capacidade de uma pessoa para realizar certas atividades ou tarefas mentais, como aquelas que precisam de concentração, cálculos e memória. A maioria das atividades de aprendizagem requerem as três habilidades citadas, sendo prioridade, a manutenção da boa qualidade do ar em salas de aula.

A contaminação do ar interno pode ser a origem de múltiplas doenças respiratórias. Uma baixa qualidade do ar interior, aumenta as possibilidades dos alunos de contrair doenças respiratórias ou para aqueles que já as sofrem, de acentuar o problema (EPA, 2003). No panorama geral, este fato produz duas consequências. No momento, prejudica o desempenho imediato das atividades, e no futuro próximo, reduz o desempenho escolar dos alunos, devido ao aumento do absentismo escolar, segundo o documento publicado pela EPA (2003). De acordo com o mesmo documento, o desempenho, a saúde e o conforto aumentam nos adultos, com maiores taxas de ventilação no ambiente interno. No entanto, a maioria das escolas da Europa e dos Estados Unidos da América possuem

taxas de trocas de ar, menores do que as recomendadas (EPA, 2003). Este é um fato preocupante, pois segundo os dados oferecidos, o desempenho, o conforto e a saúde dos alunos estão sendo diminuídos e comprometidos, uma vez que nem os níveis mínimos estão sendo alcançados em grande quantidade deste tipo de espaço.

Além do CO₂, produto da combustão mecânica e humana, alguns dos poluentes mais comuns e suas fontes são odores ruins, os Componentes Orgânicos Voláteis (VOCs) originados por materiais de construção da edificação ou dos móveis, ou por produtos de limpeza; umidade excessiva devido a áreas úmidas e de atividade física; o Ozônio, o monóxido de Carbono (CO) gerado por combustões incompletas; o material particulado, os asbestos e a fumaça ambiental de tabaco (DEPARTMENT FOR EDUCATION, 2006).

De outra forma, fenômenos ambientais, tais como a Temperatura Interna e a Umidade Relativa, fatores presentes nos ambientes internos, são determinantes no conforto dos usuários, e podem afetar, diretamente, o desempenho e a saúde destes (EPA, 2003). No caso das crianças, em idade escolar, as altas temperaturas diminuem o desempenho escolar, mas temperaturas muito baixas diminuem as habilidades manuais e a velocidade dos alunos na realização das atividades (EPA, 2003).

Tanto essa pluralidade espacial, requerida para possibilitar diferentes práticas pedagógicas, como o comportamento destes fenômenos ambientais, mencionados acima, são produto do projeto do espaço, projeto que está orientado por uma série de parâmetros definidos nas diretrizes e normas de cada contexto, e que serão apresentadas a seguir.

2.2.1 Parâmetros para o projeto da sala de aula, segundo Caderno Técnico n. 4 (2002)

Dentro deste documento, os parâmetros base de projeto, para cada tipo de espaço, estão listados em forma de tabelas. Esta dinâmica de *Check List*, é uma forma prática de enunciar as necessidades de cada espaço com respeito aos diferentes tópicos envolvidos na criação deste, pois os profissionais têm, claramente, delineados os parâmetros a cumprir.

Cada Tabela está organizada em forma de ficha, composta por um selo com o título como identificador do tipo de ambiente e o código; este está composto pelas siglas do conjunto de espaços afins (Ambientes de Ensino e Docência – ED- para Salas de Aula), o número do subgrupo que está sendo apresentado e a letra inicial da localização deste (Urbano ou Rural).

Posteriormente, uma tabela com localização, segmento e o número de usuários. Embaixo, um parágrafo com as observações de funcionalidade, uma tabela com os parâmetros base, e, finalmente, um parágrafo de observações técnicas do ambiente.

A tabela de parâmetros base está dividida em 3. O primeiro campo é o aspecto ambiental; o segundo, é o parâmetro recomendado para escolas novas, e o terceiro, o parâmetro mínimo para escolas existentes.

A tabela 1 apresenta os dados contidos na tabela de parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros Básicos de Projeto para Salas de Aula, segundo o Caderno Técnico

Condicionantes Ambientais	Parâmetros	
	Recomendados - Escolas Novas	Mínimo - Escolas Existentes
Area Útil por aluno	1.32 m ² ou mais	1.15 m ²
Largura Útil	7.50 m ou mais	5.10 m
Comprimento Útil Máximo	8.10 m	9.50 m
Vão livre portas	1.20 m com Visor	0.90 m com Visor
Pé-direto	3.00 m livre sob Viga	2.60 m livre sob viga
Abertura para Iluminação Natural	1/4 da área do piso ou mais	1/5 da área do piso ou mais
Abertura para Ventilação Natural	1/8 da área do piso ou mais	1/10 da área do piso ou mais
Insolação	Evitar insolação direta	Evitar insolação direta
Iluminação Artificial	Fluorescente/Eletrônica	Fluorescente
Nível de Iluminamento	500 lux	300 lux
Tempo para uma troca de Ar	2 Minutos	6 Minutos
Nível Máximo de Ruído Externo	40 dB	45 dB
Laje/Forro	Obrigatória	Obrigatória
Ventilação Cruzada	Obrigatória	Obrigatória
Paredes	Semi-Impermeáveis e Claras	Semi-Impermeáveis e Claras
Piso	Lavável e Antiderrapante	Antiderrapante
Carga Adicional Prevista	500kgf/m ²	300kgf/m ²

2.2.2 Parâmetros para o projeto de salas de aula, segundo a Norma Técnica Colombiana, NTC 4595 (1999)

A Norma NTC 4595 está dividida em capítulos, nos quais as características enunciadas, de forma concisa, pela tabela do Caderno Técnico, são apresentadas parâmetro a parâmetro.

* Área por Aluno:

Dentro do Capítulo 4, Classificação dos Ambientes, a área requerida por aluno é determinada, segundo o tipo de ambiente. Para Ambientes tipo A, a área necessária por aluno está compreendida entre 1.65 e 2.0 m², dependendo do nível de escolaridade. A tabela 2 apresenta a área definida para cada nível.

Tabela 2. Área recomendada por Aluno, segundo o Nível de Escolaridade (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999)

Ambiente	No. máximo de Estudantes / Professor	Área (m2/Estudante)
Educação Infantil (3-4 anos)	15	2.00 m2
Educação Infantil (4-5 anos)	20	2.00 m2
Educação Infantil (5-6)	30	2.00 m2
Ensino Fundamental e Médio	40	1.65 até 1.80 m2

Para as áreas deste tipo de ambiente, a norma esclarece que nos níveis de educação Básica e Média, equivalente aos níveis de Ensino Fundamental e Médio, no Brasil, se o espaço não tiver a capacidade para 40 pessoas, deve-se aumentar a área de cada estudante em uma proporção de 0.10m², quando o número de alunos diminuir em 10 indivíduos. Por outro lado, se forem usados móveis de trabalho individuais (de dimensões aproximadas a 0.7m por 0.5m), uma área de 1.80m² é recomendada.

* Conforto Térmico e Ventilação:

O numeral 7.3 da Norma, denominado “Conforto térmico”, “refere-se às condições ambientais necessárias para garantir que um número máximo de usuários das instalações escolares não considere o clima como um fator que perturbe o desenvolvimento

de suas atividades” (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999). No entanto, em muitas ocasiões, não é o clima que gera esse desconforto, mas a modificação à condição inicial, produto do comportamento final dos espaços projetados, consideração que não apresenta a norma. Do mesmo modo, esta norma determina que para essas condições serem garantidas, não serão levados em conta mecanismos especializados, como o condicionamento de ar, e considera-se que os fatores que compõem o condicionamento térmico são a ventilação e o controle da admissão solar.

Avaliando a Norma, desde o tema de interesse deste trabalho (a ventilação), estabelecem-se alguns parâmetros básicos para o projeto dos dispositivos de ventilação natural, o que é feito com base na classificação dos 3 tipos de climas das regiões colombianas: temperado e frio (temperatura que flutua entre 5°C e 22°C, com variações marcadas entre o dia e a noite, e uma umidade relativa que oscila entre 40% e 60%), quente e seco (temperatura que flutua entre 5°C e 35°C, com mudanças acentuadas de temperatura entre o dia e a noite e uma umidade relativa entre 10% e 60%), e quente e úmido (temperatura que flutua entre 22°C e 32°C, que se mantém relativamente constante durante as 24 h do dia e umidade relativa que está entre 65% e 95%).

A Norma, nos itens 7.3.2, 7.3.5 e 7.3.6 (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999), faz referências pertinentes às diretrizes de projeto. Para os climas quentes, é recomendado que as superfícies onde estão localizadas as aberturas para ventilação, sejam orientadas, de forma tal, que o vento incida sobre estas, em um ângulo entre 30 e 90°. Para o clima quente e úmido, recomenda-se que a incidência do vento seja de 45°, e para os climas moderadamente frios, recomenda-se que as superfícies, com aberturas, não sejam expostas diretamente aos ventos predominantes. Igualmente, a norma enfatiza que os espaços educativos devem estar ventilados por correntes de ar que ingressam, diretamente, desde o exterior e não desde outro espaço interior. Exige, assim mesmo, que o pé-direito destes espaços seja de 3,00m e que a área efetiva de abertura seja de 1/15 a 1/12 da área do piso em climas frios e temperados; 1/9 da área do piso em climas quentes secos e 1/6 da área do piso em climas quentes úmidos.

A Tabela 3 apresenta os dados enunciados anteriormente e os dados restantes listados na Tabela 1 do item anterior.

Tabela 3. Parâmetros de projeto de salas de aula, segundo a Norma NTC 4595

Condicionantes Ambientais	Parâmetros		
	Clima Quente - Seco	Clima Quente - Úmido	Clima Frio e Temperado
Área Útil por aluno	1.65 até 1.80 m ²	1.65 até 1.80 m ³	1.65 até 1.80 m ⁴
Largura Útil	Não especificado	Não especificado	Não especificado
Comprimento Útil Máximo	Não especificado	Não especificado	Não especificado
Vão livre portas	0.80 m ou mais	0.80 m ou mais	0.80 m ou mais
Pé-direto	3.00 m	3.00 m	2.70 m
Abertura para Iluminação Natural	1/4 da Área do piso	1/5 da Área do piso	1/3 da Área do piso
Abertura para Ventilação Natural	1/9 da Área do piso	1/6 da Área do piso	1/15 a 1/12 da Área do piso
Insolação	Sempre que puder, janelas orientadas perpendicularmente ao eixo norte-sul, e		
Iluminação Artificial	Fluorescente	Fluorescente	Fluorescente
Nível de Iluminamento	300 lux	300 lux	300lux
Tempo para uma troca de Ar	Não especificado	Não especificado	Não especificado
Nível Máximo de intensidade Sonora	40 até 45 dB	40 até 45 dB	40 até 45 dB
Laje/Forro	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Ventilação Cruzada	Obrigatória	Obrigatória	Obrigatória
Paredes	Coeficientes de reflexão: Paredes diferentes, mas não localizadas na frente		
Piso	Antideslizante, com um coeficiente de reflexão entre 15 % – 30 %		

*os dados registrados nesta tabela, são os correspondentes aos valores recomendados para os Ambientes Tipo A dos Ensinos Fundamental e Básico.

2.3 CONFORTO TÉRMICO

De acordo com a ASHRAE Standard 55, o conforto térmico é “aquela condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico, e é avaliado subjetivamente” (ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010). Este conforto, segundo a mesma norma, está relacionado com 6 fatores primários: a Taxa Metabólica, o Isolamento das roupas, a Temperatura do Ar, a Temperatura Radiante, a Velocidade do Ar e a Umidade do Ambiente. Desses fatores primários, os 2 primeiros são variáveis de caráter pessoal, pois estão ligados às decisões das pessoas e, os 4 últimos, são de caráter ambiental.

A NBR 15220, norma brasileira de desempenho térmico das edificações, define este como a “satisfação psicológica de

um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Por outro lado, o Caderno térmico n 4, documento que orienta o projeto de espaços escolares, só faz referência ao conforto térmico, desde o aspecto físico do espaço, de como este ganha e perde calor, mas não oferece uma definição do que considera como *Conforto Térmico*.

Em contrapartida, a Norma Colombiana NTC 4595, que faz referência aos espaços educativos, define o conforto térmico como as “condições ambientais necessárias para garantir que o número máximo de usuários das instalações escolares não considere o clima como um fator que perturbe o desenvolvimento das atividades” (MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999).

Definir o conforto térmico é uma tarefa complexa, pois depende, não somente de variáveis ambientais, mas da sensação, da percepção e do parecer das pessoas. Estas variáveis fisiológicas e psicológicas variam de indivíduo para indivíduo, fazendo com que um ambiente termicamente aceitável para uma pessoa, seja insatisfatório para outra.

No entanto, vários modelos para avaliação de conforto térmico foram desenvolvidos a partir da segunda metade do século XX (FANGER, 1970). Estes estudos podem ser feitos mediante duas abordagens, os modelos estáticos e os modelos adaptativos.

A primeira abordagem considera o usuário como um receptor passivo do ambiente térmico. A segunda, considera o sujeito como um agente ativo, que realiza ações para modificar seu ambiente térmico de acordo com sua sensação e sua preferência térmica.

O primeiro tipo de modelo, o Estático, é realizado em câmaras climatizadas artificialmente, cujas variáveis ambientais são totalmente controladas e modificadas até se encontrar a melhor combinação entre elas, que resulte em uma situação de conforto (FANGER, 1970).

Os estudos do segundo tipo, denominados Adaptativos, são resultado de análises e estudos feitos em campo, com os usuários fazendo suas atividades em condições ambientais reais. Durante estes estudos, as pessoas atuam sobre seu próprio conforto por meio de várias oportunidades adaptativas, em oposição ao modelo de balanço térmico de abordagem estática,

que para muitos autores e pesquisadores, não considera os aspectos culturais e sociais, associados ao conforto térmico (HALAWA; VAN HOOFF, 2012).

2.3.1 ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2010)

A versão mais recente desta norma foi publicada pelo Comitê de Normativas da ASHRAE, durante o ano de 2013. No momento em que este trabalho de pesquisa foi proposto como projeto de dissertação de mestrado, a versão vigente era anterior a esta, publicada no ano de 2010. Por esta razão, foram mantidas as referências à versão de 2010, cujos limites são mais restritivos que os da Norma de 2013. Para este trabalho, uma vez cumpridos estes limites são também atendidos os limites da versão posterior.

Na versão adotada da Norma, são listados dois tipos de métodos para avaliar o conforto térmico nos espaços habitados, descritos nas seções 5.2 e 5.3 (ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010):

*“Método para determinar condições térmicas aceitáveis em espaços ocupados”.

O Primeiro dos métodos listados na Norma, na seção 5.2, está baseado no modelo desenvolvido por Fanger, e avalia o conforto térmico das pessoas por meio de dois índices, o PMV, *Predicted Mean Vote*, e o PPD, *Predicted percentage of Dissatisfied*, e da escala de sensação térmica desenvolvida pela ASHRAE, onde: -3 é muito Frio, -2 é Frio, -1 é Levemente Frio, 0 é Neutro, 1 é Levemente com Calor, 2 é com Calor e 3 é com muito Calor.

Este modelo pode ser aplicado em espaços onde as atividades realizadas possuem taxas metabólicas entre 1.0 e 2.0 met e a roupa usada pelos ocupantes fornece 1.5 clo ou menos de isolamento térmico.

Apesar do modelo ter sido testado em vários estudos, e ser reconhecido pela ASHRAE, foi observado que este Modelo, tem uma tendência a sobre-estimar a sensação térmica dos usuários em espaços e ambientes naturalmente ventilados

(FANGER; TOFTUM, 2002). Neste tipo de espaço, os usuários têm uma maior tolerância ao calor, em comparação com aqueles que trabalham ou habitam espaços condicionados artificialmente. Estes ocupantes estão preparados para suportar temperaturas um pouco mais altas ou baixas, em temporadas de Verão e Inverno, pois essa expectativa das temperaturas exteriores, definida pelas estações, torna-os mais tolerantes. Esta condição foi referenciada por Halawa e Van Hoof (2012), como a *Hipótese da Expectativa*.

Fanger e Toftum (2002), apresentam uma alternativa que poderia ser usada como uma intenção do Modelo do PMV, para ser aplicado a ambientes não artificialmente condicionados, em climas quentes. Esta extensão do modelo consiste em multiplicar um fator, denominado *fator de expectativa*, ao PMV para corrigir ou acoplar a sensação térmica prevista à percebida em espaços naturalmente condicionados.

* “Método alternativo para determinar as condições térmicas aceitáveis em espaços naturalmente ventilados”.

O segundo modelo propõe uma forma de avaliação do Conforto Térmico para espaços onde as condições térmicas são reguladas, principalmente, pelos ocupantes do ambiente.

Alguns pesquisadores, como Conceição et al. (2012), encontraram em seus estudos que:

Os entrevistados sempre tentam adaptar-se ao ambiente térmico existente. Estas adaptações são altamente governadas por seu contexto sociocultural e suas tradições. Em edifícios ventilados naturalmente, as temperaturas do ar correspondentes ao ambiente térmico confortável, variam devido a mudanças nas condições ambientais interiores e exteriores (CONCEIÇÃO et al., 2012. p. 197).

Devido a esta razão, e às observações feitas sobre as dificuldades para fazer uso do método anterior em espaços naturalmente ventilados, a ASHRAE standard 55 (2010), propõe este método alternativo para espaços naturalmente ventilados.

Assim como o método anterior, baseado no PMV, este modelo tem restrições em seu uso, já que foi projetado para espaços onde os ocupantes fazem atividades físicas com taxas metabólicas entre 1.0 e 1.3 met. Além disso, só pode ser usado em latitudes cujas temperaturas externas não sejam menores a 10°C e não superem os 33.5°C.

Este método, baseado na relação entre temperatura exterior e temperatura operativa, como apresenta a figura 2, permite avaliar o espaço, com base em um gráfico com um limite de 80% de aceitabilidade, e outro, de 90%, sendo o primeiro o valor usado mais comumente na maioria dos espaços que contêm atividades comuns, e o segundo, usado para espaços de altos requerimentos térmicos.

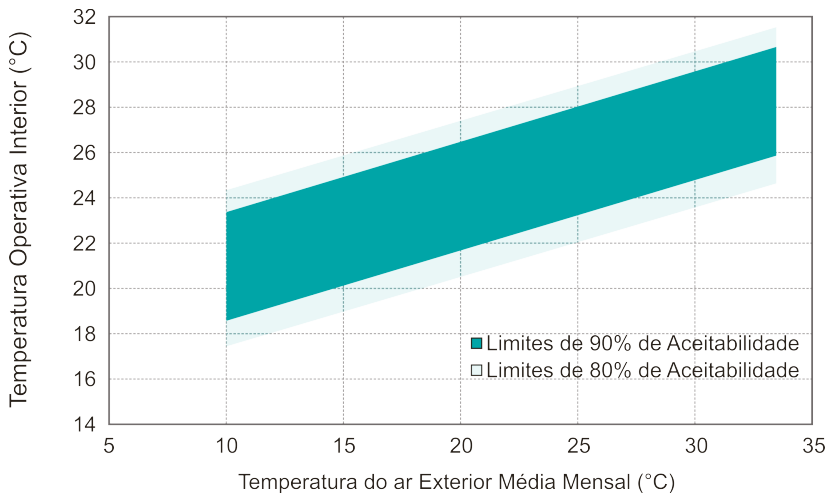


Figura 2. Temperatura Operativa aceitável em espaços naturalmente condicionados (Fonte: Adaptado da ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010).

Levando em consideração as salas de aula, ambos os métodos de avaliação podem ser usados neste tipo de espaço. As atividades realizadas dentro destes, faz com que a taxa metabólica das pessoas, seja similar às realizadas em trabalho de escritório, que se encontra entre 1.0 e 1.3 met, respeitando os limites estabelecidos para ambos os modelos.

Por outro lado, a norma não faz referência, nem apresenta restrições, com respeito à quantidade de usuários permitidos nos espaços a serem avaliados, logo pode ser assumido que este pode ser usado em espaços com poucas pessoas; ou naqueles, com uma grande quantidade de usuários, como é o caso da sala de aula.

2.3.2 Variáveis ambientais e pessoais

De acordo com a ASHRAE, quando se faz referência ao conforto térmico, deve-se levar em conta 6 fatores primários, que estão diretamente envolvidos com o Conforto Térmico. Alguns dos fatores são de caráter ambiental, outros de caráter pessoal.

Os fatores de caráter ambiental, considerados dentro deste grupo são: a Temperatura do Ar, a Temperatura Radiante Média, a Velocidade do Ar e a Umidade do Ambiente. Os fatores de caráter pessoal são: a Taxa Metabólica e o Isolamento das Roupas (ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010).

Os primeiros são produto dos fenômenos ambientais e climáticos locais, e o comportamento e desempenho térmico do espaço avaliado. Os pessoais, por outro lado, são produtos da eleição das pessoas ou da sua atividade.

A combinação destes 6 fatores primários define a zona de conforto, e estes são usados nos cálculos de índices como PMV, por exemplo. O documento da ASHRAE 55 faz algumas considerações sobre cada um deles, na maioria dos casos, aportando limites máximos e mínimos, e quando este não for o caso, algumas recomendações são oferecidas para garantir o conforto ao interior do ambiente avaliado ou projetado.

2.3.3 Velocidade do ar e conforto térmico

No caso da velocidade do ar, esta norma considera que um valor elevado desta, permite que o limite máximo da temperatura operativa aceitável, seja aumentado em determinadas condições. Isto porque, a sensação térmica real é diminuída pela perda de calor por convecção, produzida pelo movimento do ar perto da pele.

A ASHRAE oferece dois métodos para o cálculo da quantidade de graus, aos quais a temperatura operativa pode ser aumentada. O primeiro, é um método gráfico, cuja quantidade de graus é calculada com a ajuda de um gráfico, que relaciona estes com a velocidade do ar e a diferença entre a temperatura radiante e a temperatura do ar.

O segundo método é conhecido como SET, Standard Effective Temperature model, que é baseado em uma simulação termofisiológica do corpo humano para reduzir qualquer combinação de variáveis ambientais e pessoais, na temperatura de um ambiente imaginário, standard, no qual a perda de calor do ocupante por meio da pele é igual à de uma pessoa no ambiente real (ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2010).

Embora este último modelo permita calcular esta relação para uma grande quantidade de combinações das variáveis envolvidas, o modelo gráfico define um limite de 0.8 m/s para a velocidade do ar. Buscando evitar que a brisa atrapalhe o trabalho de escritório, movimentando folhas de papel ou produzindo secura nos olhos, ou, produza desconforto localizado por correntes localizadas de ar.

Porém, Toftum (2004) resalta que, se o movimento do ar é ou não bem-vindo, é uma pergunta que só pode ser respondida por aqueles que estão expostos a este. A percepção ou apreciação deste fenômeno depende de muitas variáveis, que, como no caso do conforto, são de caráter ambiental e pessoal. A forma como o movimento do ar é percebido, depende tanto das propriedades físicas quanto das ambientais do ar, como a sua velocidade, a flutuação da corrente e a sua temperatura. E que depende também, em grande medida, da sensação térmica e do nível de atividade do usuário do espaço.

A tabela 4 relaciona algumas das variáveis mencionadas acima, e como estas influenciam a percepção do movimento do ar, segundo o observado por Toftum (2004).

Tabela 4. Percepção do movimento do ar de acordo com a Temperatura, a Atividade, e a Sensação Térmica

Temperatura	Atividade	Sensação Térmica	Velocidade do Ar	Percepção do Movimento de Ar
< 23°C	Atividades Sedentárias	Neutralidade - Frio	Qualquer	Indesejável
> 23°C	Com ou sem Níveis elevado de Atividade	Levemente com Calor	Entre 0.2 e 0.8 m/s	Desejável
Altas Temperaturas	Com ou sem Níveis elevado de Atividade	Levemente com Calor ou com Calor	> 0.8 m/s	Muito Desejável mesmo a Velocidades Altas

* Ambientes Frescos ou Moderados

Em ambientes com estas características, as correntes de ar podem ser consideradas como indesejáveis, ainda mais se estas são turbulentas, apresentando grandes variações em curtos períodos de tempo.

Os seres humanos, quando estão realizando altos níveis de atividade, ou estão em neutralidade térmica, ou com calor, mesmo em espaços frescos, são menos sensíveis ao movimento do ar. Mas no caso de menores níveis de atividade, como no trabalho de escritório, ou ao estar se sentindo com frio, ou levemente com frio, as pessoas são mais propensas a reclamar por correntes de ar localizadas.

Igualmente, segundo Toftum (2004), a direção da proveniência destas correntes pode ser um fator importante. Se a corrente vem por baixo, a percentagem de insatisfação tem uma maior tendência a aumentar. Pelo contrário, se esta vem por cima, esta percentagem tende a diminuir.

* Ambientes mais quentes

Nos climas quentes, a velocidade do ar é um agente que ajuda a compensar as altas temperaturas, ainda mais no clima quente-úmido, pois ambientes localizados nestes, além de possuírem uma maior temperatura, têm uma maior umidade relativa.

Para manter a temperatura interna, o corpo humano libera calor a seu ambiente com o auxílio de vários mecanismos de

troca térmica. Estas trocas são realizadas através da pele e da respiração, produzindo perdas sensíveis e latentes de calor.

Através da pele, o corpo tem uma perda sensível de calor por meio da radiação e a convecção, e uma perda latente de calor, por evaporação do suor e por dissipação da umidade da pele (LAMBERTS et al., 2012). Através da respiração, o corpo humano, perde calor por convecção (perda sensível de calor), e por evaporação (perda latente de calor).

A perda de calor por evaporação é suprimida nos espaços com altas temperaturas, acompanhadas por altas percentagens de umidade. Nesses casos, a velocidade do ar sobre a pele ajuda a manter uma sensação térmica aceitável para os usuários, pois melhora a perda de calor por convecção.

Estudos em cidades com climas quentes e úmidos, como os realizados por Cândido et al. (2010), na cidade de Maceió-AL, mostram que as razões pelas quais o limite de velocidade foi definido como 0.8m/s, podem ser toleradas pelos habitantes dos ambientes, em troca de uma melhoria na sua sensação térmica. Na presença de velocidades aproximadas, ou maiores às contempladas pela Norma, uma percentagem considerável de usuários acharam seu ambiente térmico aceitável (CÂNDIDO et al., 2010).

Nos questionários realizados por pesquisadores, a pergunta da aceitabilidade térmica foi explícita, permitindo analisar diretamente este aspecto do conforto. Foi concluído, que a faixa de temperatura operativa não pode ser o único fator de definição do conforto neste tipo de clima. Nos espaços estudados, o movimento do ar demonstrou ser um fator determinante, fato enfatizado ainda mais pelo uso constante de ventiladores, clara ação que demonstra uma preferência do usuário, em incrementar a velocidade do ar ao seu redor (CÂNDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011).

Consequentemente, para temperaturas entre 24 e 29°C, velocidades entre 0.4 e 0.8m/s são recomendadas para manter uma sensação térmica agradável para os usuários. Quando as temperaturas incrementam, velocidades superiores a 0.81m/s são necessárias para manter essa sensação térmica (CÂNDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011; TOFTUM, 2004).

2.3.4 Princípios físicos do movimento do ar

Considerando a importância que tem o movimento do ar no conforto térmico das pessoas dentro dos espaços, é importante esclarecer os princípios básicos que produzem ou permitem este movimento de ar nos espaços internos.

“A intensidade e distribuição do escoamento de ar no interior de um ambiente são determinadas pelas diferenças de pressão encontradas nas diversas superfícies do edifício” (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010), e estas diferenças de pressão podem ser produzidas por dois fenômenos naturais; por uma diferença de temperatura, por conseguinte da densidade entre o ar interior e o ar exterior do espaço (Pressão Estática), ou pelas forças exercidas pelo vento sobre as diferentes superfícies exteriores da edificação (Pressão Dinâmica).

2.3.4.1 Pressão estática:

Esta é a força motriz do fenômeno que convencionalmente é chamada de ‘Efeito Chaminé’. O movimento do ar, neste caso, depende da diferença de temperatura entre o ar aquecido e o ar circundante, e da diferença de alturas entre às aberturas de entrada e saída do ar, como ilustrado na figura 3.

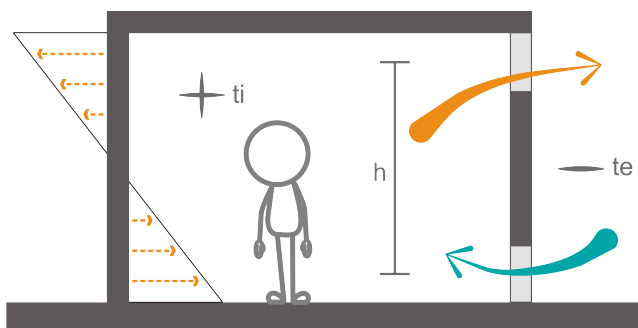


Figura 3. Esquema do movimento do ar devido à diferença de pressão estática (Fonte: Adaptado de BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010)

O ar do interior do espaço é aquecido e torna-se mais leve, deslocando-se para a parte superior do recinto; se este possui uma abertura superior (ver figura 3), o ar sairá através dela,

criando uma zona de baixa pressão, devido à qual o ar exterior circundante, de menor temperatura será arrastado ao interior através das aberturas inferiores.

2.3.4.2 Pressão dinâmica:

Esta, “é a pressão produzida pela força da velocidade do vento e está associada à energia cinética do movimento da corrente de ar” (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010). Em ocasiões, é chamada pressão de estagnação nos pontos onde a velocidade é levada a zero (0) e a energia cinética é transformada em pressão, como é ilustrado na figura 4, onde são localizados os pontos de estagnação, e as zonas de pressão positiva e negativa, para duas figuras de geometrias diferentes.

As pressões são sempre positivas, mas para uma melhor compreensão do fenômeno, são usados na nomenclatura, os signos de “+” (positivo) e “-” (negativo), para representar as zonas de maior e menor pressão, com relação à pressão atmosférica.

As zonas do escoamento que apresentam valores da pressão acima da pressão atmosférica e exercem um empuxo nas superfícies do edifício, foram consideradas como zonas de pressão positiva. Aquelas zonas em que a pressão é menor que a pressão atmosférica, e um efeito de sucção é produzido nas superfícies do edifício, são chamadas de zonas de pressão negativa (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010. p. 37).

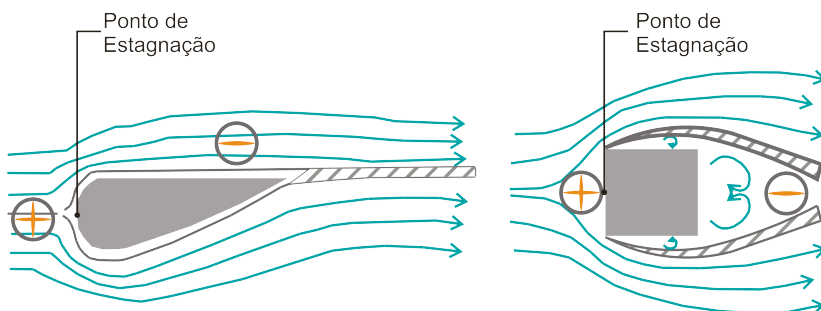


Figura 4. Campos de pressão em um corpo aerodinâmico e um cubo
(Fonte: Adaptado de Aynsley; Melbourne; Vickery, 1977 e Givoni, 1976 (apud BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010)).

2.3.4.3 Infiltração

A infiltração não é uma estratégia de ventilação por si, mas é um fenômeno que acontece na maioria dos ambientes construídos, condicionados ou não condicionados naturalmente. A infiltração é “o vazamento para o interior, sem controle de ar exterior, através de fissuras, interstícios e outras aberturas não intencionais de um edifício, causadas pelos efeitos da pressão do vento e do efeito chaminé” (LIMB, 1992).

As aberturas mediante as quais a infiltração ocorre, definidas como fissuras ou frestas, são aquelas que têm dimensões menores a 10mm (ALLARD, 1998). Em geral, as aberturas que não são portas ou janelas, são consideradas como tais. As frestas e fissuras são usualmente produto da união entre dois materiais ou elementos construtivos, como entre os vãos das paredes onde são instaladas as esquadrias, ou mesmo entre a janela e o perfil metálico.


O aporte que este fenômeno tem na ventilação pode ser considerável, podendo ser um complemento a esta. No entanto, na maioria dos casos, é desconsiderada dentro das estimativas do cálculo efetivo das taxas de fluxo de ar, ou é levada em consideração, de forma simplificada, desconsiderando igualmente seu potencial ou influência na ventilação do espaço (PIETRZYK, 2000).

2.3.5 Importância da velocidade do ar para garantir conforto térmico nas salas de aula

Como foi ressaltado em várias oportunidades, falar de Conforto Térmico é uma tarefa complexa, pois envolve as pessoas, seus contextos, preferências, expectativas, decisões e percepções. Toftum (2004), resalta que em um mesmo ambiente, com temperaturas e velocidades de ar iguais, cada pessoa pode ter uma percepção diferente do ambiente térmico ao seu redor.

Os ambientes escolares, em especial, as salas de aula, podem ser usados por quase toda a população, mesmo se a pessoa se encontra fora dos limites definidos ou considerados como a idade escolar. Por outro lado, esta população apresenta grandes variações, e possui processos de aprendizagem diferentes para cada etapa escolar. A Figura 5 evidencia

algumas dessas variações, apresentando os dados e observações mais importantes de limitações e realizações, segundo cada etapa cognitiva, baseada na teoria de Piaget (COOK; COOK, 2005).

Idade	Limitações	Conquistas
0-2 Anos 	<p>Nenhum pensamento representacional, as crianças não podem formar símbolos internos no início desta fase.</p> <p>Permanência do objeto está faltando no início desta fase.</p>	<p>* O pensamento representacional e simbólico emerge gradualmente à medida que a fase avança.</p> <p>* Permanência do objeto se desenvolve, enquanto o estágio avança.</p>
Pensamento Sensorial-Motor		
2-7 Anos 	<p>Lógica intuitiva leva ao egocentrismo, animismo, artificialismo, e uma incapacidade de usar formas mais objetivas de lógica.</p> <p>Esquemas não são reversíveis, não operacional.</p> <p>As crianças não conseguem tarefas de conservação por causa da centralização, foco em pontos finais estáticos, e a falta de reversibilidade.</p>	<p>Representações e símbolos mentais emergentes são vistos na linguagem, a arte e o jogo.</p>
Pensamento Pre-operacional		
7-12 Anos 	<p>A Lógica está limitada a materiais e experiências, concretas e tangíveis</p>	<p>O pensamento lógico é mais objetivo, permite habilidades como inclusão social e transitividade.</p> <p>Os esquemas podem ser reversíveis, operacionais.</p> <p>As crianças passam por problemas de conservação, devido à descentralização, focam-se nas transformações dinâmicas, reversibilidade.</p>
Pensamento Operacional Concreto		
12 Anos e Mais 	<p>Egocentrismo adolescente é visto na plateia imaginária e história pessoal</p>	<p>Emerge o raciocínio hipotético - dedutivo</p> <p>Emerge o pensamento abstrato</p>
Pensamento Operacional Formal		

* Fonte Original: TABLE 5.1 Piaget's Four Stages of Cognitive Development (COOK; COOK, 2005).
Tradução da Autora.

Figura 5. Limitações e Realizações de acordo com a ida com a etapa cognitiva, segundo Piaget (COOK; COOK, 2005)

Existem várias teorias sobre o processo de desenvolvimento cognitivo das crianças e estudantes, mas a

teoria de Piaget foi escolhida para ser referenciada, pois de acordo com os especialistas na área de desenvolvimento da criança, o trabalho *A origem da inteligência em crianças*, deste autor, é ainda considerada a publicação mais revolucionária e influente sobre o tema (COOK; COOK, 2005).

De acordo com Azevedo (2002), a maioria das teorias sobre o tema referem-se a dois tipos de construção do conhecimento. *Apriori*, na qual o conhecimento é produzido dentro do mundo mental do sujeito, que vai sendo reorganizada mediante a percepção do seu ambiente exterior, e *Empiricamente*, na qual o conhecimento vai sendo forjado na mente do sujeito por meio da sua experiência no ambiente e com os objetos circundantes.

A teoria de Jean Piaget está orientada, de acordo com a proposta da aprendizagem através da ação. Esta é denominada por vários autores como construtivista (COOK; COOK, 2005) ou Interacionista (AZEVEDO, 2002), e é definida por eles como um processo no qual o sujeito aprende com a ajuda de suas ações, interpretando o ambiente e a experiência nova, sob a ótica do conhecimento previamente adquirido e a experiência já vivida. Piaget, apesar de reconhecer que a maturação biológica é um dos fatores limitadores de como o processo cognitivo é alcançado, faz uma ênfase importante no ambiente, e como a interação do indivíduo com este é essencial para esse tipo de desenvolvimento.

Por outro lado, a pergunta sobre se esse fator, a idade, e outros, como o gênero e a fadiga geram ou não maior suscetibilidade aos elementos ambientais, é constante. De acordo com alguns estudos feitos na Alemanha (GRIEFAHN; KÜNEMUND, 2001), com um grupo de pessoas de idades entre 18 e 70 anos e de ambos sexos, com o mesmo valor de isolamento das roupas, os pesquisadores encontraram que o gênero feminino e as pessoas fadigadas apresentam maior susceptibilidade às correntes de ar localizadas.

Em relação às idades, o estudo mostrou que não se tinham suficientes provas para afirmar que a diferença de idade influenciava, efetivamente, a percepção deste fenômeno. No entanto, foi observado, que o nível de atividade tem grande influência, e que é comum que as pessoas mais novas sejam mais ativas que os usuários mais velhos (GRIEFAHN; KÜNEMUND, 2001).

Foi ressaltado no estudo de Griefahn e Künemund (2001), da mesma maneira que, essa percepção da velocidade do ar, depende, em grande medida, do ambiente, no qual o usuário está inserido. Embora as correntes localizadas sejam consideradas desconfortáveis para pessoas em ambientes com temperaturas internas baixas, em ambientes quentes, as brisas são bem-vindas, como foi ressaltado no item anterior.

Por outro lado, este estudo desenvolvido na Alemanha, e muitos como este, foram realizados com uma amostra que continha apenas, sujeitos de estudo em idade adulta, mesmo abrangendo uma ampla faixa etária. Da mesma forma, os modelos de conforto comumente usados e registrados nas diferentes normativas e Standards, como o Modelo de Fanger e o Modelo Adaptativo, são produtos de numerosos e cuidadosos estudos em adultos. No entanto, estes tipos de estudo também são aplicados a espaços usados por crianças e adolescentes, como no caso das salas de aula, assumindo que as percepções e sensações térmicas destes são iguais às dos adultos.

Sendo cientes deste fato, Teli, Jentsch e James, (2012), realizaram um extenso estudo de conforto térmico em salas de aula destinadas a alunos entre 7 e 11 anos de idade no Reino Unido. Ambos os tipos de modelos, tanto Termo-psicológicos (PMV e PPD) como de conforto adaptativo, foram aplicados, fazendo algumas alterações nas fórmulas e operações matemáticas, para acoplar estas às crianças e adolescentes, que possuem valores, e.g., de taxas metabólicas e isolamento das roupas, diferentes às dos adultos. Os autores ressaltaram que se fazer estudos de conforto térmico em adultos é difícil, realizar estes com crianças é uma tarefa ainda mais complexa. A qualidade do ar afeta seu bem-estar físico, sua saúde, sua capacidade de aprendizagem e certamente, seu conforto; mas as crianças ficam facilmente entediadas com atividades repetitivas, e alguns dos conceitos usados para definir o conforto podem ser complexos demais para alunos dessa idade. Por esta razão, os pesquisadores procuraram simplificar, criando incentivos e materiais didáticos para fazer perguntas relativamente simples quando são enunciadas aos adultos. Segundo o encontrado nestes estudos, as crianças assumem limitadas ações adaptativas para ajustar seu ambiente térmico durante os períodos de aulas. Em sua maioria, estas decisões são tomadas pelos docentes. E em outras ocasiões, em situações

desconfortáveis e tendo a possibilidade de tomá-las eles mesmos, como no caso de pôr e remover peças de roupa, os estudantes não modificaram suas condições térmicas (TELL; JENTSCH; JAMES, 2012).

Outros autores, como Humphreys (1977) e Mors et al. (2011), observaram nos seus próprios estudos algumas destas dificuldades, com respeito aos modelos e ferramentas logísticas e conceituais.

Humphreys (1977), percebeu também que as crianças modificam suas roupas para melhorar sua sensação térmica entre grandes períodos de tempo, com mudanças graduais de temperatura, e.g, entre estações, mas não para variações diárias. Esta característica de mudança diária foi observada só nos alunos mais velhos do estudo (9 anos). Igualmente, considera que para estudos de Conforto Térmico, em crianças, sejam considerados outro tipo de métodos, alternativos ao questionário, como métodos baseados na observação ou em medições psicológicas. Ressalta, por outro lado, que as crianças têm um metabolismo mais alto que os adultos, usam roupas diferentes e ainda realizam atividades diferentes das realizadas por eles. Consequentemente, não pode ser assumido que estes tenham as mesmas necessidades térmicas, e possam ser estudados com os mesmo modelos e medidos com as mesmas escalas que os adultos (HUMPHREYS, 1977).

Mors et al. (2011), realizaram igualmente, estudos em salas de aula condicionadas naturalmente, usando o modelo desenvolvido por Fanger e o Modelo Adaptativo. Eles ressaltam que, assim como muitos estudos, observaram que o primeiro destes modelos *sobre-estima* a sensação térmica dos adultos que habitam espaços ventilados naturalmente, no caso das crianças em idade escolar, este modelo *subestima* sua sensação térmica, igual que o modelo adaptativo usado no estudo.

Os autores concluíram, que “para melhorar o conforto nas salas de aula de Ensino Básico, a temperatura interna deve ser mantida alguns graus mais baixa, que os limites para prédios de escritório” (MORS et al., 2011), em concordância com o observado por Teli, Jentsch e James (2012). Eles ressaltaram que as crianças têm uma sensação térmica mais quente que os adultos, preferindo em consequência, temperaturas internas mais baixas que aquelas preferidas pelos adultos.

Em conclusão, pesquisas sobre este tema indicam que são necessários mais estudos sobre modelos que sejam aplicáveis para prever e avaliar o conforto térmico de crianças e adolescentes. Os modelos existentes, mesmo com algumas alterações, que aproximam mais as condições reais destes usuários, não representam com precisão a sensação térmica destes.

2.3.5.1 Ocupação e fluxo de ar ao interior dos espaços

A relação entre o espaço e o fenômeno ambiental, e como sua combinação afeta os usuários tem sido amplamente estudada, como demonstram os estudos enunciados no item anterior. No entanto, é importante aprofundar nessa relação desde a abordagem contrária, para explorar como o usuário, como obstrução ao fluxo livre de ar dentro de um espaço, modifica este.

Bode et al. (2013), observaram que no projeto de ambientes internos, na maioria das vezes, não é reconhecida a influência que os fluxos convectivos provocados por fontes de calor, como o corpo humano, têm na distribuição do ar em um ambiente. No entanto, estas modificações podem ser significativas, e sua consideração é importante, ainda mais quando se busca estimar o conforto dos habitantes do espaço.

Huang e Lin (2013), por outro lado, estudaram a correlação entre a distribuição espacial das áreas de trabalho e os equipamentos, e o campo de controle do fluxo de ar em uma Fábrica de Enzimas, e descobriram que este primeiro parâmetro, a distribuição, tinha uma influência significativa no fluxo de ar. Os fluxos turbulentos ou vórtices são produzidos no interior do espaço, quando o fluxo de ar encontra um obstáculo, razão pela qual, levar estes em consideração é muito importante, especialmente, quando há presença de contaminantes ou agentes nocivos para a saúde das pessoas, como no caso deste tipo de fábricas.

Ahmed, Ahmad e Rahim (2010, 2011), nos seus estudos, trabalharam com um modelo de um quarto, onde foi inserido um obstáculo aquecido para estudar como este afetava o fluxo de ar. O fluxo de ar foi avaliado com obstáculos de 3 tamanhos diferentes. Fazendo uso de soluções numéricas das equações

que regem a massa, o momentum e as propriedades escalares do fluxo de ar, utilizando um computador, eles encontraram que a eficiência da ventilação aumenta com diminuições no tamanho do obstáculo e vice-versa.

Estes estudos ressaltam a importância de levar em consideração, tanto o aporte térmico que podem ter os obstáculos dentro do espaço, como e.g. o calor produzido pelo corpo humano, graças aos processos metabólicos, como o tamanho deste e a sua distribuição no espaço.

Wang et al. (2013), nesta linha de pensamento, e integrando o conceito de conforto térmico, modelaram uma sala de aula de um colégio existente, com ventilação de deslocamento na Alemanha, e avaliaram esta com 30 alunos e um professor, representados como cubos, por meio do código CFD ANSYS/CFX. Uma vez modelada e simulada a sala, foi observado que a primeira fileira, enumerando estas, desde a abertura de entrada do ar, estava submetida ao fluxo de ar que entra a uma temperatura aproximada de 18°C, pelo que, esses usuários, poderiam estar em risco de sofrer desconforto térmico por correntes localizadas de ar. À medida que o fluxo inicial percorre a sala, a temperatura desta vai aumentando, devido ao aporte térmico dos objetos, apresentando temperaturas maiores a 21°C, a partir da terceira fileira, e chegando a quase 24°C na sexta. Este estudo oferece uma visão interessante do fenômeno, pois resalta a possibilidade de que pessoas, usuários de um mesmo espaço, podem ter condições ambientais diferentes, de acordo com sua posição dentro da sala, neste caso particular, da sua distância com respeito à abertura de entrada do ar, e a quantidade de pessoas na sua frente.

Para o caso estudado por Wang et al. (2013), essa proximidade poderia significar um desconforto devido à localização do colégio ao que pertence o objeto de estudo. No entanto, se considerarmos um clima com outras características, como o clima quente e úmido, poder-se-ia teorizar que a situação é a contrária. A diferença entre a primeira e a sexta fileira dentro da sala é aproximadamente de 6°C, razão pela qual é possível que, dependendo da velocidade do ar, entre mais perto da janela, maior probabilidade tem o usuário de melhorar a sua sensação térmica, aproveitando a movimentação e a temperatura inicial do ar que entra na sala. Esta consideração resalta, então, a visão de que a movimentação do ar ao redor

de uma pessoa pode ser ou não bem-vindo de acordo com as condições do contexto no qual o sujeito está inserido.

Finalmente, como foi mencionado na introdução, Castro Gallego et al. (2012, 2013), com testes experimentais com túnel de vento, ressaltaram, que além de modificar a temperatura do vento, as formas de ocupação, a posição corporal e a distância à abertura de entrada de ar, podem modificar a distribuição do fluxo do ar dentro do espaço. Estudos foram realizados com um modelo em uma escala reduzida de uma sala de aula de um Jardim Infantil, objeto de estudo com características muito parecidas com o objeto de interesse da presente dissertação.

2.3.6 Ferramentas de avaliação da ventilação natural

Para prever o comportamento da ventilação no interior de uma edificação, vários modelos podem ser usados. Cada um deles tem suas vantagens e limitações, e podem ser de maior utilidade em alguns casos, e não ser recomendados para outros.

Chen (2009) e Chen et al. (2010), realizaram um estudo com o propósito de oferecer uma visão geral dos modelos mais usados na predição e avaliação dos sistemas de ventilação, natural e mecânica, e enumerar e ressaltar suas vantagens e desvantagens. Em geral, estes podem ser classificados em três grupos, os modelos de cálculo, os modelos físicos e os modelos de simulação computacional. A seguir, serão apresentadas as principais características, vantagens e desvantagens destes grupos e os seus principais modelos.

2.3.6.1 Modelos de cálculo

Aos modelos de cálculo pertencem os Modelos Analíticos e os Modelos Empíricos. São modelos baseados na solução de equações e funções, pelo que não precisam de ferramentas computacionais de grande potência.

Os modelos analíticos são derivados de equações fundamentais da dinâmica de fluidos e da transferência de calor. São simplificações, tanto da geometria como dos limites das condições de termo-fluidos, medidas tomadas para obter uma solução mais simples. Devido a isso, é possível que a equação

aplicada em um caso, não seja adequada para outro, sem modificações.

Estes modelos para predizer o comportamento da ventilação, são mais antigos, mas são muito usados pela sua simplicidade, e não precisam de muitos recursos computacionais. Por outro lado, eles não são a ferramenta mais apropriada para usar em casos muito complexos. Na atualidade, ainda são muito úteis, e são considerados uma boa ferramenta neste campo de ação (CHEN, 2008).

Os modelos Empíricos, assim mesmo, são derivados das equações de conservação de massa e energia, mas podem fazer uso de dados obtidos em medições experimentais ou em simulações computacionais. Essas informações são úteis para encontrar coeficientes que possam ser aplicáveis aos modelos em desenvolvimento. Existem muitos modelos empíricos, e em ocasiões, estes podem usar mais aproximações que os modelos analíticos, ou serem combinados com eles para prover mais informação. São considerados como uma ferramenta efetiva e econômica para os profissionais, tais como: engenheiros e projetistas da ventilação em edificações, embora dependam, em grande medida, de cada caso (CHEN, 2008).

2.3.6.2 Modelos físicos

Os modelos físicos podem ser de dois tipos, de pequena escala e de escala real.

Os modelos de pequena escala são técnicas de medição que permitem predizer ou avaliar o desempenho da ventilação no interior de um espaço, fazendo uma representação deste em uma escala menor.

O vento é um fenômeno ambiental que, diferente da iluminação, por exemplo, não se comporta igual em todas as escalas. Por isso, o fluxo de ar não será igual no espaço real e no modelo em escala. Uma das alternativas para superar este impasse é usar um fluido com uma densidade diferente, como a água. De outra maneira, a informação obtida pela medição pode não corresponder à situação real.

Este modelo é efetivo e econômico, mas além de possuir problemas escalares em alguns dos fatores da teoria da termodinâmica, pode apresentar, da mesma forma, grandes

difficultades para escalar geometrias de fluxo complexas. Segundo o encontrado no estudo realizado por Chen (2008), esses tipos de modelos, mais do que como método de avaliação, são usados como ferramenta de validação para outros métodos.

Os modelos de Escala Real são muito utilizados, mas seguem a mesma tendência dos modelos de pequena escala. Em outras palavras, são utilizados para validar outros modelos de medição.

Os modelos de Escala real podem ser de dois tipos. O primeiro, corresponde à “experimentação em Laboratório”. Neste, as avaliações são feitas em uma Câmara Ambiental, que imita um quarto ou um andar de uma edificação composto por vários quartos. Se o estudo considerar as condições de vento exterior, este modelo deve ser inserido em um Túnel de Vento, o que implicaria grandes custos. Além disso, não é muito prático elaborar um modelo em escala real de um espaço de grandes dimensões para predizer o comportamento do vento no seu interior.

O outro tipo de modelo, denominado modelo “in loco”, faz referência à construção de um modelo em escala real, no lugar real. Devido a isso, não são muito úteis para fazer predições do comportamento da ventilação, já que precisam da construção do local a ser avaliado e as condições termodinâmicas não são controladas. Assim mesmo, é muito provável, que os dados resultantes deste modelo não sejam aplicáveis a outros locais, nem em localizações perto do lugar de estudo. Portanto, estes modelos são usados com frequência para avaliar prédios já existentes.

Apesar de estes modelos oferecerem predições mais realistas do comportamento da ventilação, são muito caros e precisam de uma grande inversão de tempo, e da mesma forma não estão livres de erros (CHEN, 2008).

2.3.6.3 Modelos de simulação Computacional

Os modelos de simulação computacional são os modelos mais recentes neste campo. Usualmente, requerem um processador computacional de alto desempenho. Os modelos pertencentes a esta classificação são os Modelos Multizonais, os Modelos Zonais e os modelos CFD.

Os modelos Multizonais, ou de Rede multizonal, oferecem uma boa alternativa para prever as taxas de troca de ar e a distribuição do fluxo de ar entre vários espaços em uma edificação. Podem calcular a eficiência destas variáveis, a demanda energética do sistema, o transporte de poluentes entre estes espaços e fazer avaliações do controle de fumaça. Estes softwares resolvem equações de conservação, mas assumem uniformidade em algumas das variáveis ambientais. Isto pode ocasionar erros em alguns casos. Apesar de sua grande utilidade, tem uma interface e uma apresentação dos resultados pouco amigável ou atrativa para os usuários, já que foram desenvolvidos como instrumentos de laboratório. No entanto, são ferramentas poderosas de projeto, sobretudo no planejamento de grandes edificações.

Os modelos Zonais, em contraposição a este detalhe, foram desenvolvidos para resolver os erros ou dificuldades que os dados assumidos nos modelos Multizonais podem ocasionar. São modelos que dividem um espaço único, em várias células, onde é calculada a variável, ponto a ponto. Este processo é feito para determinar a não uniformidade das células no espaço.

Estes sistemas são desenvolvidos, baseados em padrões de fluxo medidos ou em equações de massa e balanço. Não são de fácil uso, e seu tempo de simulação é quase igual ao dos modelos CFD, o *Computer Fluid Dynamics*, que resolvem numericamente equações diferenciais parciais, e sua solução apresenta a distribuição no espaço de algumas variáveis como pressão, velocidade, e temperatura do ar, entre outras. Assim, é altamente provável que os modelos zonais sejam substituídos pelos CFD no futuro (CHEN, 2008).

O modelo CFD, apesar de apresentar incertezas como todos os métodos feitos por simulação, de precisar que o usuário tenha bons conhecimentos no tema de mecânica de fluidos e uma capacidade computacional muito alta, ganharam muita popularidade com o desenvolvimento e melhora da capacidade dos computadores e o desenvolvimento de interfaces mais amigáveis. Na atualidade são muito utilizados.

* O PHOENICS

ANSYS CFX, FLUENT, OpenFOAM e PHOENICS, são exemplos de alguns dos códigos ou softwares que trabalham

com códigos CFD. Segundo a CHAM (Concentration Heat and Momentum Limited), Empresa Britânica de Engenharia de Softwares, criadora do PHOENICS, esta é “uma ferramenta de baixo custo, fiável e fácil de usar, que simula processos envolvendo o fluxo de fluidos, o calor ou a transferência de massa, a reação química e de combustão, em equipamentos de engenharia ou no ambiente” (CHAM, 2013).

Este software é um CFD ou Computer Fluid Dynamics Software, usado em diversas disciplinas, mas que no caso da Arquitetura e da Construção, permite que “grande variedade de condições ambientais possam ser avaliadas em uma fração de tempo, e em uma fração de custo, necessário para realizar experimentos de campo ou testes em túnel de vento”.

Os pesquisadores da área de Conforto podem fazer uso desta ferramenta para avaliar o comportamento do vento no interior de edificações e espaços urbanos, ponto a ponto, obtendo resultados de maneira qualitativa, através de representações como as cores falsas que caracterizam as diferentes variáveis avaliadas no modelo; ou quantitativamente, fazendo uso de arquivos de texto, gerados pelo programa, que permitem fazer processamento de dados.

Em contraposição aos modelos numéricos multizonais, como o Airflow Network do Software EnergyPlus, amplamente usado no estudo da ventilação de edificações e sua efetividade, este software pode obter valores das variáveis para cada ponto do espaço, permitindo uma análise mais detalhada do fenômeno distribuído no espaço, mas só durante um período de tempo, ou seja, permite avaliar o fenômeno de forma estática.

De acordo com a literatura avaliada por Chen (2008), os modelos analíticos são boas ferramentas para entender os mecanismos da ventilação. Na prática são muito usados, mas no ano de 2007, só 3% das publicações desse ano estavam relacionadas como este tipo de Modelo.

Os modelos Empíricos, segundo o autor, são considerados “o pão de cada dia”, do estudo do comportamento da ventilação. Embora, as publicações relacionadas a este modelo representem apenas 2% das publicações, ainda têm muita importância no meio.

Quanto a modelos físicos, os modelos de pequena escala, são menos caros que os de escala real. Devido a isto, têm ainda muito campo de ação, principalmente como ferramentas de

validação, sendo usadas, paralelamente, a outros modelos, quais sejam: os analíticos, os empíricos e os numéricos. As publicações relacionadas a estes modelos são iguais a 3% quando foram usados como único método de avaliação, e a 5% quando foi incluído o uso paralelo de outros métodos.

Os modelos de escala real ainda têm muita popularidade. Em sua maioria, nos artigos estudados pelo autor, foram realizados com o fim de gerar dados para modelos CFD, e no total de publicações estudadas, equivalem a 10%. As publicações relacionadas aos modelos multizonais, foram equivalentes a 7%, e as relacionadas aos modelos zonais a 3%.

Finalmente, os modelos CFD foram, segundo a literatura, os modelos mais usados, com aproximadamente 70%, o que mostra que estes são uma ferramenta muito útil neste campo de ação, mesmo considerando-se apenas uma das muitas aplicações que têm estes softwares. No entanto, 2 de cada 3 estudos feitos com estes modelos, como precaução, foram validados com outro tipo de modelo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O propósito deste referencial teórico foi contextualizar o tema de interesse deste trabalho de pesquisa. Foram apresentados conceitos teóricos dos princípios básicos do movimento do ar, bem como, do conforto térmico, as salas de aula e seus usuários.

Os estudos e documentos examinados ressaltam a importância das condições adequadas em salas de aula, como agente protagonista no processo educativo; da sua flexibilidade para conter diferentes práticas pedagógicas, atividades e usuários; e da importância de certificar que os níveis mínimos requeridos de ventilação sejam alcançados, para assegurar a saúde, o conforto e o bom desempenho dos estudantes e as atividades de ensino.

O conforto térmico é uma percepção humana, e dessa forma, como foi ressaltado por vários autores, é altamente subjetivo. Os modelos desenvolvidos para medir este em ambientes condicionados artificial e naturalmente têm suas vantagens e desvantagens, assim como suas possíveis

aplicações e limitações. Os modelos existentes que foram padronizados, como os contidos na norma, ainda se estão adaptando, e se estão desenvolvendo novos, para outros tipos de usuários, , como as pessoas idosas ou aqueles usuários que ainda não alcançaram a idade adulta..

O fluxo do ar, sendo um dos fatores determinantes na sensação térmica, demonstra que sua percepção é influenciada em grande medida pelas condições de temperatura, umidade e velocidade do ar. Assim, embora em climas frios e temperados, ou ambientes com características similares, uma brisa direta, ou localizada, pode ser considerada desconfortável, segundo a atividade feita pelo usuário. Em climas quentes, secos e úmidos, com níveis de atividade igual, ou menor, a mesma brisa é bem-vinda, inclusive, quando esta supera, às vezes, com grandes diferenças, os limites recomendados pelas Normas, especialmente os limites das versões mais antigas desta.

Mesmo que as faixas de conforto térmico para adultos sejam conhecidas, esta idade representa somente o limite superior da multiplicidade de idades que usam as salas de aula. Os estudos encontrados não especificam uma faixa precisa de conforto para crianças e adolescentes, mas foi concluído que, nestas idades, ambientes com temperaturas levemente mais frias são preferidas.

A faixa de conforto dentro de uma sala de aula, então, poderia ser a intersecção entre a faixa dos adultos e a faixa das crianças e adolescentes, tomada como o limite inferior, a temperatura menor da faixa de conforto para os adultos, e como o limite superior, a temperatura maior da faixa das crianças e adolescentes. No entanto, a faixa de conforto destes últimos não foi definida por nenhuma das referências consultadas, nem pode ser inferida a partir da informação encontrada nelas.

Entretanto, o foco deste estudo é a distribuição do fluxo de ar nas salas de aula, localizadas em climas quentes e úmidos, e com verões com essas características. Portanto, o risco de desconforto, por frio, é relativamente pequeno, sendo possível desconsiderar o limite inferior. Mas para assegurar que todos os usuários estejam confortáveis, o limite superior teria que ser definido *alguns* graus abaixo do limite superior para os adultos. No entanto, a expressão *alguns graus*, usada por Mors et. al (2011), é muito vaga para definir uma quantidade específica. Desta forma, devido à falta de informação neste aspecto, os

limites da faixa de conforto dos adultos serão usados como referência para a definição do conforto neste documento.

Algumas das referências estudadas apresentaram dados que demonstram as alterações que sofrem as correntes de ar durante seu percurso através do espaço. São evidenciadas mudanças na sua temperatura à medida que recebe o aporte calórico das fontes de calor presentes no espaço. Da mesma forma, foi observado por vários pesquisadores como o fluxo original pode ser alterado pelos obstáculos que encontra no seu caminho. Gallego et. al (2012), da mesma maneira, ressaltaram como a forma de ocupação altera o fluxo de ar original avaliado no espaço vazio, demonstrando a influência do usuário nos fenômenos ambientais interiores e a necessidade de aprofundar no tema e quantificar o fenômeno desta mudança.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos e ferramentas usados no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. O capítulo está dividido em duas partes. A primeira apresenta as características climáticas base para a avaliação dos modelos, e as ferramentas usadas para esta avaliação. A segunda apresenta passo a passo, como foi desenvolvido o trabalho com o intuito de atingir os objetivos propostos.

Esta pesquisa consiste em um estudo exploratório que visa avaliar o efeito que diferentes formas de agrupamentos dos usuários têm na distribuição interna do fluxo do ar dentro das salas de aula. Os modelos que foram avaliados estão localizados em uma cidade tropical de clima quente-úmido, e em uma cidade de clima subtropical, apresentando condições de Verão com as mesmas características.

O estudo foi dividido em duas etapas consecutivas. Em primeiro lugar, foram modelados os casos de estudo em um código CFD, o PHOENICS, onde foram avaliados modelos sem a presença de usuários (vazios), com variações na incidência e na velocidade do vento. Posteriormente, foram avaliados, nestas mesmas condições ambientais, com diferentes formas de distribuição dos usuários.

Após a obtenção dos valores, ponto a ponto, da distribuição da velocidade do fluxo de ar para cada um dos casos resultantes, foram encontradas as diferenças destas distribuições, adotando, como base, a distribuição inicial do fluxo do ar no espaço vazio.

A figura 6 apresenta um esquema, com os parâmetros e variáveis que compõem o total de simulações feitas no software.



Figura 6. Esquema da composição dos modelos de estudo

3.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DAS CIDADES DE REFERÊNCIA

Para definir as condições ambientais iniciais dos casos base, mesmo estes sendo hipotéticos, é preciso considerar a informação climática de cada um dos contextos para os quais as normas foram desenvolvidas.

O Brasil e a Colômbia possuem grande variedade de climas dentro do seu território, portanto, para realizar a avaliação, foi selecionada uma cidade de cada país, como ponto de partida. Florianópolis – SC foi escolhida para o contexto brasileiro, e Medellín, para o contexto colombiano. A partir das características climáticas e ambientais destas cidades, foram definidos os parâmetros de projeto e as condições iniciais para os modelos, elementos que serão descritos neste capítulo.

3.1.1 O Clima

O clima é o “conjunto dos fenômenos meteorológicos (temperatura, pressão atmosférica, ventos, precipitações) que caracterizam o estado médio da atmosfera e sua evolução em um lugar dado” (DICIONÁRIO DO AURÉLIO, 2013). A definição de clima está associada a diferentes variáveis ambientais e ao seu comportamento, sendo que vários pesquisadores, como Francisco José de Caldas (1802), Richard Lang (1915), Emmanuel Martonne (1937), Wilhelm Köppen (1923), entre outros, desenvolveram diferentes escalas ou classificações para sua definição.

Alguns países como a Colômbia, adotaram algumas destas classificações para definir as condições climáticas das suas diferentes regiões. As classificações citadas acima, respondem a interesses específicos, relacionados com diferentes tipos de disciplinas, incluindo a Agronomia e a Botânica, por esta razão, outros países perceberam a necessidade de desenvolver sua própria classificação, de acordo com as características climáticas do seu território, orientadas à proposta de estratégias bioclimáticas, como no caso do Brasil.

As informações climáticas oferecidas para cada região geralmente são similares, apresentando dados como a temperatura de bulbo seco exterior, a umidade relativa, a

nebulosidade, as velocidades de vento predominantes, e a radiação solar, entre outras. No entanto, as *formas* de como são apresentadas podem variar consideravelmente.

Tomando como exemplo a velocidade do vento, esta geralmente é apresentada em gráficos denominados Rosas dos Ventos, que ressaltam as velocidades predominantes para as 8 orientações principais e a sua frequência de ocorrência. Dependendo da fonte destes gráficos, a informação pode ser ilustrada de diferentes formas, por exemplo, alguns apresentam as velocidades médias para cada estação no ano; outras apresentam velocidades predominantes, e outras, a frequência de ocorrência por faixas de valores (ver figura 7).

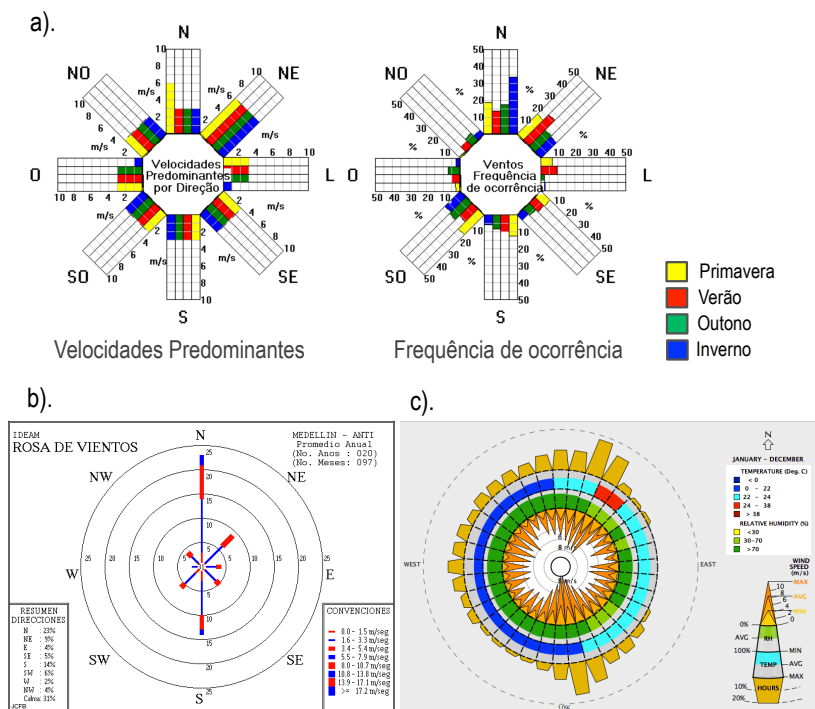


Figura 7. Diagramas de Rosa dos Ventos. a). Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis – SC, Software *Analysis SOL-AR* (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, [s.d.]). b). Rosa dos Ventos para a cidade de Medellín – Colômbia, IDEAM (1999). Rosa dos ventos para a cidade de Florianópolis – SC, Software *Climate Consultant* (ENERGY DESIGN TOOLS - UCLA, 2012).

3.1.1.1 Florianópolis – SC, Brasil

O território brasileiro, devido à sua extensão, possui vários tipos de clima. Lamberts, Dutra e Pereira (2004, *apud* ALMANAQUE ABRIL, 1995), (2004, *apud* ALMANAQUE ABRIL, 1995), listam uma divisão do clima brasileiro em 6 regiões básicas: Tropical, Equatorial, Semiárido, Subtropical, Tropical Atlântico e Tropical de Altitude.

A Norma de desempenho térmico de edificações, NBR 15220 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), divide este tipos de climas em 8 zonas bioclimáticas homogêneas, com a finalidade de produzir algumas recomendações técnico-construtivas, visando à otimização do desempenho térmico das edificações, mediante uma melhor adaptação climática.

A cidade de Florianópolis – SC está localizada no clima subtropical, clima caracterizado por possuir estações diferenciadas durante o ano. De acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro, esta cidade está localizada na zona Bioclimática 3, ilustrada em azul na figura 8.

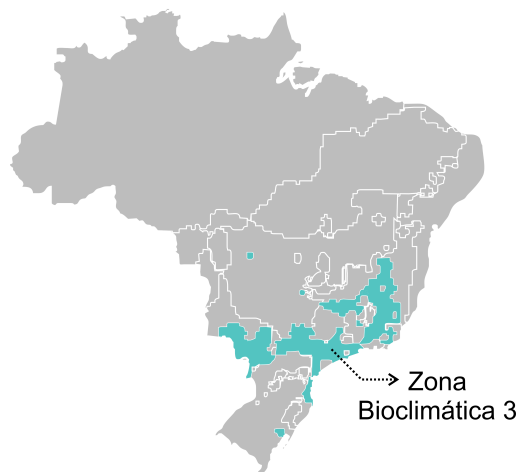


Figura 8. Mapa do Brasil com a Zona Bioclimática 3

Florianópolis localiza-se no sul do país, a uma Latitude de 27°40' Sul e uma Longitude de 48°33' Oeste, e encontra-se a uma altitude de 7m sobre o nível do mar. Possui estações de Verão e Inverno diferenciadas, sendo que o Verão é caracterizado por temperaturas entre 22 e 30°C e umidades relativas altas, superiores a 80%. E o Inverno, por temperaturas entre 12 e 23°C, com os mesmo valores de umidade relativa.

Os meses que apresentam as maiores temperaturas são os 3 meses iniciais do ano - Janeiro, Fevereiro e Março -, com temperaturas médias entre 24 e 25°C, e umidades relativas entre 85 e 87%. A figura 9 apresenta as temperaturas médias, a média das máximas e a média das mínimas, e a umidade relativa média de Florianópolis – SC, para cada um dos meses do ano.

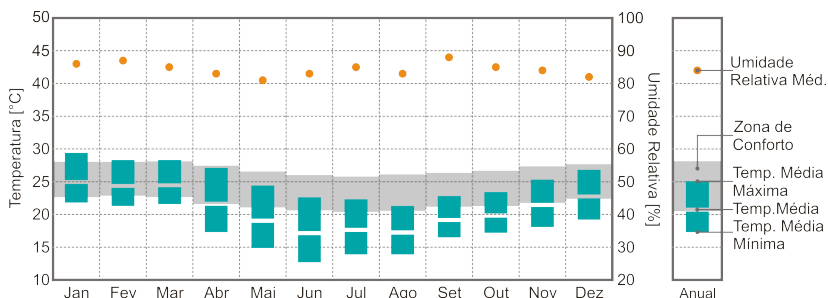


Figura 9. Temperatura média e Umidade Relativa média para cada mês do ano, Florianópolis – SC.

Os ventos predominantes são norte e nordeste, com uma velocidade média entre 3 e 6 m/s. Durante o Verão, temporada de estudo deste trabalho, a maior percentagem de ocorrência é a nordeste, com frequência de 21.4%, e uma velocidade média de 6m/s. A Figura 10 apresenta a Rosa dos Ventos da cidade de Florianópolis – SC, com as velocidades predominantes e frequências de ocorrência para as 8 direções mais comuns.

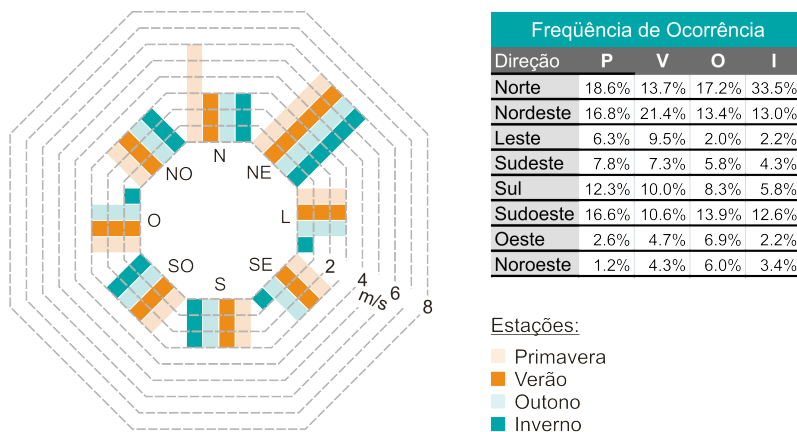


Figura 10. Rosa dos Ventos Florianópolis - SC. Fonte: Software Análisis SOL-AR (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES)

Da mesma forma, sendo que Florianópolis está localizada no hemisfério Sul do planeta, as definições do Verão e do inverno equivalem à lógica desse hemisfério.

3.1.1.2 Medellín, Colômbia

De forma complementar, será estudada a cidade de Medellín, localizada na Colômbia, no departamento de Antioquia. A cidade, um dos núcleos de desenvolvimento mais importante deste país, localizada na Cordilheira Central dos Andes, foi fundada no Vale do Rio Aburrá, conhecido como Rio Medellín, na extensão que atravessa a cidade.

A cidade está localizada a uma latitude de 6°14' norte, e a uma longitude de -75°34' oeste, com uma altitude de 1479 m. Entre as zonas localizadas no vale e as localizadas na encosta, esta cidade possui uma diferença de aproximadamente 400 m de altura.

De acordo com a Norma NTC 4595 (MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL, 1999) que divide o território colombiano em três tipos de climas, frio e temperado, quente-seco e quente-úmido, esta cidade pertence à última classificação. Por outro lado, O IDEAM, *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colômbia*, faz uma

classificação detalhada, baseada em alguns dos modelos climáticos dos pesquisadores que foram mencionados no item 3.1.1 Clima. A tabela 5 apresenta a classificação climática, segundo 4 das classificações mais comuns.

Tabela 5. Classificação climática de Medellín, Colômbia, segundo Lang, Martonne, Köeppen e Holdrige

Autor / Modelo	Classificação Climática
Lang	Semiúmido
Martone	Umido Chuvoso
Köeppen	Mesotérmico Temperado Úmido, com chuvas de moderada intensidade todo o ano
Holdrige	Temperado Úmido

A faixa de temperaturas é bastante homogênea durante o ano, apresentando uma diferença máxima entre as médias mensais de 2°C. A temperatura média encontra-se entre 22 e 25°C em todos os meses do ano, e a umidade relativa varia entre 60 e 75%. A Figura 11 apresenta os dados de Temperatura e Umidade Relativa da cidade de Medellín, para cada mês do ano.

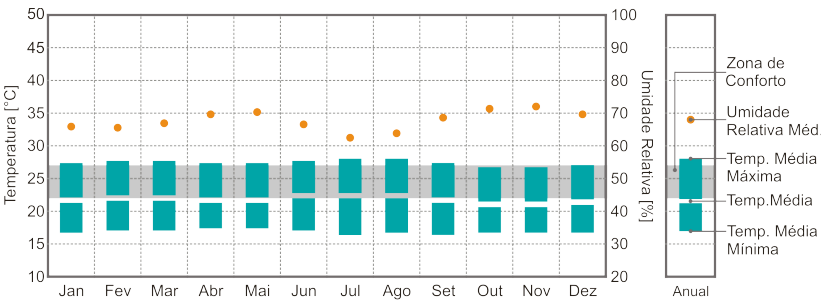


Figura 11. Temperatura e Umidade Relativa para cada mês do ano - Medellín, Colômbia

A direção predominante do vento é a norte, com uma velocidade máxima entre 5.5 e 7.9 m/s, mas sendo essas velocidades pouco comuns. A Figura 12, apresenta a Rosa dos Ventos da cidade de Medellín, com as velocidades predominantes e frequências de ocorrência para as 8 direções principais. Infelizmente, como provêm de duas fontes de informação, os dois diagramas das Rosas dos Ventos

apresentam formas diferentes de informação. Devido a isto, não foi possível manter uma mesma linguagem gráfica para os gráficos das duas cidades analisadas.

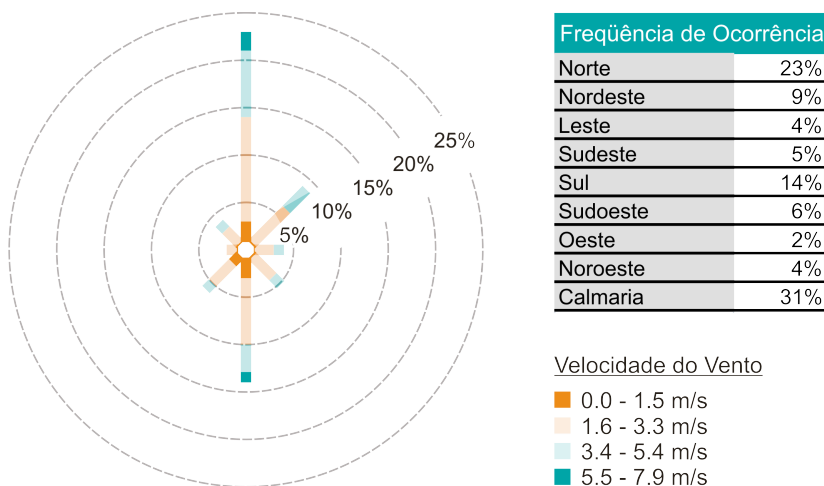


Figura 12. Rosa dos Ventos Medellín, Colômbia. Fonte: (IDEAM)

Ao contrário de Florianópolis, Medellín está localizada no hemisfério norte do planeta, com a definição de Verão e o Inverno, segundo a lógica desse hemisfério. Embora isto, não seja muito significativo devido à latitude da cidade.

3.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Existe grande quantidade de softwares que trabalham com códigos CFD. Para este trabalho de pesquisa, foi escolhido o PHOENICS, da CHAM. Este código CFD contém uma série de módulos de modelagem e simulação que se adaptam às diferentes necessidades dos pesquisadores.

Para o presente caso, foi usado o Módulo FLAIR, uma versão especial do software, desenvolvida para proporcionar uma simulação térmica e do fluxo do ar com maior facilidade para profissionais e pesquisadores da área de ventilação, aquecimento e ar condicionado. Este módulo permite prever e avaliar padrões da ventilação e a distribuição da temperatura em edificações e outros lugares fechados (CHAM, 2013).

Durante o desenvolvimento da metodologia deste trabalho, os pesquisadores tiveram a possibilidade de testar o Software, percebendo que o Módulo FLAIR adaptava-se bem as necessidades do estudo. A interface oferecida pelo módulo de visualização e as ferramentas de estudo que possui, tem uma clara representação dos objetos modelados e o fenômeno avaliado, facilitando sua compreensão.

Da mesma maneira, dos softwares considerados, era o único que oferecia um módulo com essas características. Desenvolvido para modelar e solucionar casos de ventilação, aquecimento e ar condicionado, desde a perspectiva dos profissionais destas áreas.

3.3 PROCEDIMENTOS DE MODELAGEM E ANÁLISE DE RESULTADOS

O método de estudo deste trabalho está dividido em 3 etapas básicas. A primeira etapa está composta pela definição dos modelos hipotéticos de sala de aula, segundo os parâmetros definidos pelas Normas dos contextos brasileiros e colombianos, e as características das cidades de referência. A segunda etapa consiste na simulação e avaliação dos modelos propostos, por meio do PHOENICS e outras ferramentas de cálculo, como Excel. E, finalmente, na terceira etapa, foram processados e analisados os dados encontrados, com base em uma metodologia de classificação em faixas segundo a velocidade do vento em cada ponto, que será definida em itens posteriores.

3.3.1 Etapa 1: Definição do modelos de sala de aula

Durante esta etapa, foram definidos os diferentes componentes físicos dos casos base, modelados no software PHOENICS e avaliados conforme as alterações propostas, relacionadas às variáveis ambientais e as formas como o espaço é ocupado pelos usuários.

3.3.1.1 Fase 1: Definição dos modelos para simulação

Os casos bases são resultado da combinação dos parâmetros que são listados a seguir.

* Quantidade de Usuários

A quantidade de usuários recomendada pelo Caderno Técnico no.4, é de 36 alunos e um professor; já, a recomendada pela norma NTC 4595, para os parâmetros de projeto que se propõe, é de 40 alunos e um professor.

Para a simulação do espaço, serão considerados 36 alunos em ambos os contextos, segundo o recomendado pelo Caderno Técnico, e, assim mesmo, em conformidade com o recomendado pela NTC 4595. Esta recomenda um número total de 40 alunos, mas esclarece que só devem ser aumentados 0.10 m^2 ao valor inicial da área, se esta quantidade é reduzida em 10. Dessa forma, os resultados entre contextos poderão ser comparados.

* Área e Dimensões da Sala de Aula

De acordo com o Caderno Técnico n. 4, a área requerida por aluno deve ser igual ou maior a 1.32 m^2 , para uma sala de aula destinada a 36 usuários. Por outro lado, a Norma NTC 4595 define uma faixa entre 1.65 e 1.80 m^2 por aluno.

O valor de 1.65 m^2 , limite inferior da faixa colombiana, será adotado como parâmetro, pois dessa forma, ambas as recomendações serão atingidas. De acordo com o anterior, a sala de aula e o caso base terão uma área total de 60 m^2 .

A Norma Técnica colombiana não faz referência a um cumprimento ou largura máxima ou mínima exigida. O Caderno Técnico, por outro lado, define um cumprimento máximo de 8.1 m e uma largura útil de 7.50 m como mínimo. Dessa forma, foi definido um espaço útil de 8.0 m de cumprimento e 7.5 m de largura.

* Área útil de janela e sua distribuição em fachada

As normas determinam áreas para dois tipos de janela, uma destinada à ventilação natural e outra à iluminação natural. Em alguns dos casos, uma área de janela pode cumprir ambas as funções, como, por exemplo, um elemento translúcido que permita a transmissão da luz, mas que possa ser aberto para permitir o ingresso do vento.

Para este estudo, foram escolhidas 3 formas de localização em fachada destas áreas. De acordo com as

recomendações feitas pelo Caderno Técnico n. 4 e a Norma NTC 4595, a ventilação cruzada é obrigatória. Como ilustrado pela Figura 13, foi definido como opção 1, dividir a área de ventilação em partes iguais, em duas fachadas opostas entre si; na opção 2, foi distribuída essa mesma área em duas fachadas adjacentes; e, finalmente, na opção 3, 20% da área de ventilação e de iluminação natural foram localizadas em uma janela alta na fachada norte. Os 80% restantes foram localizados na fachada oposta, estratégia aplicada neste tipo de espaço, e observada em ambos os contextos.

No caso brasileiro, $1/8$ da área do piso deve ser disponibilizado para ventilar naturalmente o espaço. As normas colombianas recomendam $1/6$ da área do piso para ventilação, para o clima colombiano.

No caso brasileiro, para as 3 distribuições em fachada, o espaço foi modelado com 7.5m^2 de área útil para as janelas de ventilação. Para os modelos que foram avaliados no clima quente-úmido colombiano, 10m^2 foram destinados para a ventilação do espaço.

As janelas foram consideradas como 100% protegidas da radiação direta do sol, por uma proteção solar, como recomendado pelas Normas, a fim de evitar o ganho de calor por radiação direta através de elementos translúcidos.

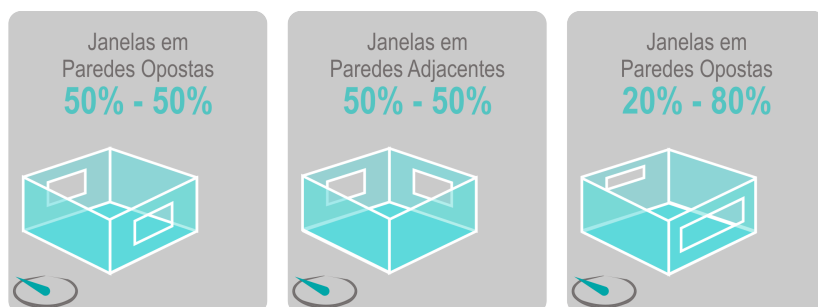


Figura 13. Distribuição da Área de Janela em Fachada

*Características dos materiais e elementos que compõem o espaço

As paredes, em contato com o exterior, foram modeladas como paredes em alvenaria, com bloco cerâmico de 9 furos de 14.0 cm e uma capa de argamassa, tanto no interior como no exterior, de 2.5 cm, configuração comum neste tipo de espaço, para ambos os contextos de estudo. As características térmicas destes elementos são enunciadas na tabela 6, a seguir.

Tabela 6. Propriedades Térmicas dos Materiais

Propriedades Térmicas					
Material	Espessura (cm)	U W/m2K	Ct kJ/m2K	α -	FCS -
Paredes e=0.85/0.95					
Argamassa Interior	2.5	1.85	161	Pintura:	
Bloco Cerâmico	14			0.2	1.5
Cobertura e Chão					
Laje Maciça	10	3.73	220	Pintura:	
				0.2	3.0
Vidro e=0.84					
Material	Espessura (mm)	U W/m2K	FS	Transmisividade	
Vidro Incolor - CEBRACE	6	5.7	0.82	0.88	

Comumente, as salas de aula são projetadas como parte de um conjunto ou agrupamento, e estão em contato com outras salas, tendo duas paredes em contato com o exterior e duas com outros espaços. Levando isto em consideração, para o caso de estudo foram considerados dois tipos de agrupamento, ilustrados na figura 14. Para as opções 1 e 3, que possuem uma ventilação cruzada através de janelas localizadas em paredes opostas, foi considerado o primeiro dos dois tipos de agrupamento, denominado linear. Desta forma, as paredes em contato com o exterior são a Norte e a Sul. Para o caso número 3, onde as janelas são localizadas em paredes adjacentes, foi considerado o agrupamento quadrado, considerando como expostas as paredes Norte e Leste. As demais paredes, o piso e a cobertura

foram considerados como elementos adiabáticos, em todas as simulações.

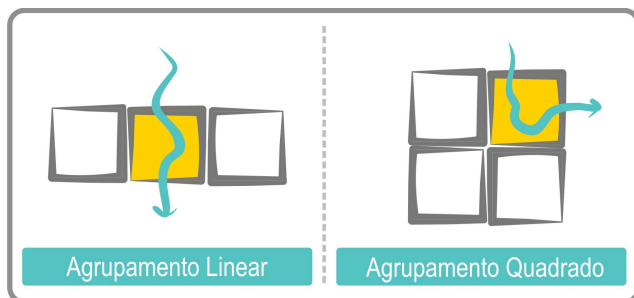


Figura 14. Agrupamentos de Salas de Aula considerados

A porção das janelas destinadas unicamente à iluminação natural foi considerada como janela fixa, de vidro simples. As propriedades deste elemento são descritas na tabela 6.

As aberturas de uma edificação, como janelas e portas, apresentam uma característica denominada coeficiente de descarga. Este, é expressado em uma razão que *“contabiliza as perdas na energia cinética do escoamento, após o mesmo passar através das aberturas localizadas nas paredes externas e internas de uma edificação”* (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010). Estas perdas são produzidas por diferentes elementos, como as esquadrias ou a estrutura da abertura. Alguns estudos têm calculado este coeficiente segundo o tipo de janela, no entanto, para este caso, as aberturas de ventilação foram avaliadas como **vãos livres**, assumindo-se um **coeficiente de descarga de 1.0**, uma vez que o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho da área útil de ventilação e não de um dispositivo específico de ventilação.

* Temperatura externa, interna e cargas térmicas do espaço

Um dos fenômenos ambientais que influenciam o fluxo do ar dentro do espaço é a troca de calor entre o exterior e o interior. Por esta razão, é necessária a definição das condições ambientais iniciais, para a simulação computacional no programa PHOENICS. A movimentação do ar, na perspectiva do conforto

térmico, gera maior bem-estar durante as épocas mais quentes do ano. Com base nesta premissa, foram selecionados os meses que apresentaram a maior temperatura média exterior, de acordo com as informações climáticas das duas cidades exemplo, selecionadas para ambos os contextos.

De acordo com a Figura 9, para a cidade de Florianópolis-SC, o mês que apresenta a maior temperatura média é Janeiro, com um valor igual a **24°C**, e uma amplitude diária de 7°C entre as temperaturas médias máximas e as médias mínimas.

De acordo com a Figura 11, para a cidade base do contexto colombiano, Medellín, o período que apresenta maior temperatura média é o mês de Julho, com uma temperatura de **23°C** e uma amplitude de 11°C entre as temperaturas médias máximas e mínimas.

A temperatura interna foi calculada com a ajuda da Tabela: *Cálculo de la Temperatura Media Interior en Región Caliente*, desenvolvida pelo Prof. Doutor Eduardo M. González C (2013).

Esta ferramenta, utiliza dados de temperatura exterior média, a oscilação da temperatura exterior, as dimensões do espaço, a área de janela, as propriedades térmicas dos materiais construtivos que compõem as vedações, a radiação solar média diária nas superfícies do mês avaliado, a potência da iluminação artificial, das pessoas em atividade, a potência interna calculada para o espaço e as trocas de ar por hora, oferece um valor de temperatura médio para o espaço.

Como condição inicial das salas de aula que compõem os casos base deste estudo, foi considerado que, até o momento da avaliação, a sala estava vazia e com as janelas de ventilação fechadas. Desta forma, como cargas térmicas, só foram consideradas a potência da iluminação artificial, a carga interna do espaço e o ganho de calor pelas superfícies em contato com o exterior, devido à radiação solar sobre elas. Os valores de radiação solar média diária para as superfícies verticais em contato com o exterior, dos casos bases, em ambos os contextos, foram obtidos dos softwares Radasol e Radasol 2 (LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - UFRGS, 2001, 2011).

Para o caso do número de trocas de ar por hora, foi considerada a troca de ar por infiltração, definido como equivalente a uma troca de ar por hora. O Anexo 1 apresenta a tabela de cálculo e os dados usados para o cálculo da temperatura interior.

Em ambos os contextos e para todos os casos, encontrou-se uma diferença de temperatura de 0.4°C , entre o exterior e o espaço interior, definindo, desta forma, uma temperatura interior inicial de **24.4°C** para o contexto brasileiro e **23.4°C** para o colombiano.

As cargas térmicas internas do espaço, produzidas pela iluminação artificial, o ganho de calor pelas superfícies das paredes, a atividade e temperatura inicial das pessoas, são listadas na Tabela 7.

Tabela 7. Cargas térmicas

Cargas Térmicas		
Elemento	Observação	Valor
Iluminação Artificial	N. de Lâmpadas: 12	Cada Uma: 32 W
	N. de Luminárias: 6	Total: 384 W
Usuário	N. De Pessoas	36 Alunos
	Superfície Corporal	1.43 m ²
	Atividade de Escritório: Escrever	60 W/m ²
	Fluxo fixo de Calor (Total)	85.8 W
	Emisividade	0.98
	Temperatura Inicial	30°C
Vidro	Fluxo fixo de Calor	-2.98 W/m2
BRA		
Paredes (Fluxo Fixo de Calor)	Norte	2.62 W/m²
	Sul	2.18 W/m²
	Leste	5.00 W/m²
COL		
Paredes (Fluxo Fixo de Calor)	Norte	2.97 W/m²
	Sul	3.09 W/m²
	Leste	4.35 W/m²

Da mesma forma que a temperatura exterior e interior, os valores apresentados na tabela 7, para os usuários e para as paredes são dados que devem ser inseridos no código CFD, com a finalidade de se calcular a temperatura interna, a pressão, a velocidade e a distribuição do fluxo de ar, em cada ponto do espaço. Os procedimentos usados para calcular o fluxo de calor, através das paredes e os coeficientes usados para as pessoas, serão explicados passo a passo em itens posteriores.

De acordo com a lógica aplicada na tabela de cálculo da temperatura média interior usada, que considera que o

comportamento diário da temperatura responde a uma curva sinusoidal, o pico mínimo de temperatura corresponde àquela hora na qual esta variável começa a aumentar, devido ao ganho de calor pela radiação solar (aproximadamente entre as 6:00 e 7:00 horas), e o pico máximo acontece próximo ao pôr do sol (quando o ambiente começa a resfriar, aproximadamente entre as 15:00 e 16:00 horas). Baseado nisto, pode-se concluir que a temperatura externa média diária seria atingida, aproximadamente, entre as 10:00 e 11:00h.

Dessa forma, o cálculo do fluxo fixo de calor das superfícies como paredes e vidros, foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = U \cdot ((\alpha \cdot I \cdot R_{se}) + T_{ext} - T_{int}) \quad (1)$$

Onde: Q é o Fluxo de Calor em W/m^2 . U é a transmitância do elemento, definida por seu material e sua composição. α é a absorvidade da superfície. I é a Irradiação solar sobre esta. R_{se} é a resistência superficial definida pela Norma como 0.04 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). T_{ext} e T_{int} são a temperatura externa e interna, respectivamente.

Para o cálculo, foram utilizadas as propriedades térmicas dos materiais, enunciadas no item anterior, na tabela 6, e os valores de irradiação solar das 10:00h.

Os valores de irradiação média horária para este horário, para cada uma das vedações, em ambos os contextos, foram extraídos dos softwares Radiasol e Radiasol 2 (LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - UFRGS, 2001, 2011). Os valores são apresentados na tabela 7.

O fluxo de calor através dos elementos translúcidos foi calculado pela expressão:

$$Q = U \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (2)$$

Onde: o fluxo de calor é igual ao produto da transmitância térmica (U) pela diferença entre a temperatura exterior (T_{ext}) e interior (T_{int}).

No caso dos usuários, o fluxo de calor fixo total foi definido como o produto da sua taxa metabólica, determinada pela atividade, neste caso, $60 W/m^2$ (ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING

ENGINEERS, 2010) e a sua superfície corporal total (1.43 m^2). Sua emissividade foi retirada da tabela de emissividades publicada pela ThermoWorks (THERMOWORKS INC, Março de 2014).

Quanto à temperatura inicial, a temperatura interna de um corpo humano saudável está perto de 37°C . Com uma capa de tecido de uma espessura aproximada de 4 cm, a temperatura da pele atinge cerca de 34°C , e quando protegida pela roupa, como no caso do estudo, atinge aproximadamente 30°C (LOMBARDI, [s.d.]), valor adotado para as simulações.

* Formas de Agrupamento

A Norma Técnica Colombiana, NTC 4595, ressalta a importância da flexibilidade do espaço, mas não apresenta esclarecimentos ou recomendações sobre que tipos de agrupamentos devem ser considerados. O Caderno Técnico Brasileiro, além dos quadros resumos dos parâmetros de projeto, oferece uma série de simulações da distribuição do espaço. Observando as diferentes formas de agrupamento analisadas nestas simulações, foram selecionadas 3 (três), consideradas distribuições comuns nas salas de aula em ambos os contextos.

Os agrupamentos verificados foram: o total dos alunos organizados em fileiras perpendiculares ao quadro, em duplas; equipes de trabalho de 4 alunos; e uma atividade em grupo, em mesa redonda. A figura 15 apresenta as diferentes formas de agrupamento dentro da sala de aula.



Figura 15. Tipos de agrupamento adotados para a avaliação do espaço

* Resumo dos Modelos

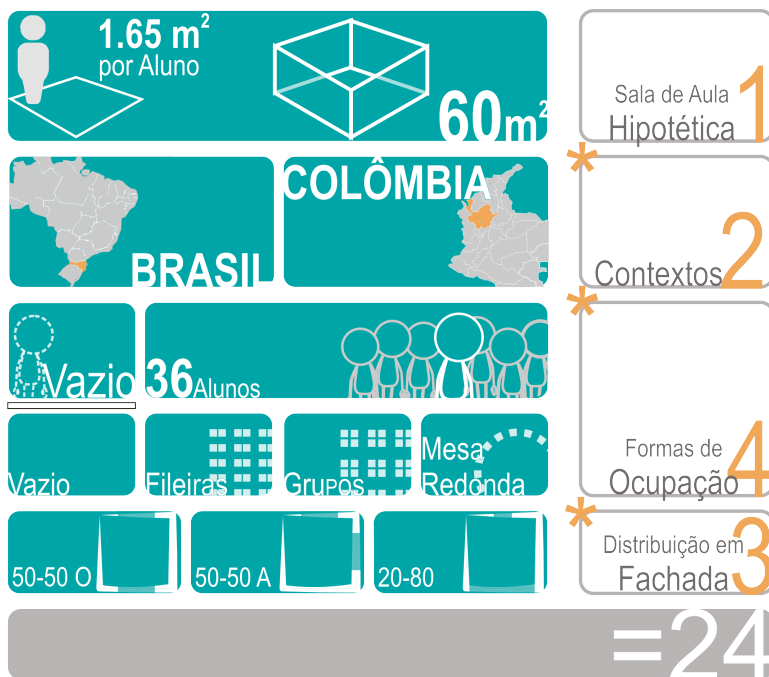


Figura 16. Quadro resumo dos casos base de estudo

O esquema ilustrado na figura 16 é um resumo das características dos modelos consideradas para este estudo. A combinação destes resulta em um total de 24 modelos.

Para a realização das avaliações foram definidos, como casos base, os modelos resultantes da combinação das duas cidades, a área definida e as três formas de distribuição das aberturas, com o espaço vazio, para um total de **6 casos base**. É importante ressaltar, que quando se faz referência ao espaço vazio, é a sala de aula sem pessoas e sem móveis.

3.3.1.2 Fase 2: Definição das variáveis de simulação

* Direção e velocidade do vento:

Os casos bases resultantes foram avaliados com uma direção do vento perpendicular à fachada norte, e com 3 velocidades diferentes: uma velocidade baixa, 0.50 m/s, uma velocidade média ou intermediária de 1,0 m/s e uma velocidade alta 1.5 m/s. Desta forma, poderá ser observada como a mudança deste fator influencia o fluxo no interior do espaço. A direção norte é comum no regime de ventos de ambos os contextos. No entanto, foram escolhidas velocidades hipotéticas, e não aplicadas as velocidades mais comuns nestas cidades, com o intuito de delimitar as variáveis do estudo e permitir a comparação dos modelos.

3.3.1.3 Fase 3: Modelagem dos elementos no Software PHOENICS

Dentro do módulo FLAIR do PHOENICS, foi definido um domínio equivalente ao tamanho da sala, 8.0 m no eixo x, 7.5 m no eixo y e 3.0 no z, com uma malha de avaliação com divisões a cada 0.10 m. O programa permite criar malhas com diferentes concentrações da retícula, definidas pelos elementos modelados, no entanto, devido à mudança na localização das janelas e das pessoas nos diferentes agrupamentos, aplicar este tipo de malha, resultaria na criação de malhas com diferentes características para cada modelo. Por esta razão, para o presente caso, foi definida uma malha regular idêntica para todos os espaços modelados, com o objetivo de comparar seus resultados.

Nas propriedades do domínio foi definida a temperatura inicial do espaço, 24.4°C para o contexto brasileiro e 23.4°C, para o colombiano.

Na barra de menu, na opção *Models* do software, foi definido, para a equação de energia, o modelo de TEMPERATURA; como modelo de radiação o IMMERSOL, “o método de manipulação simultânea de radiação e transferência de calor conjugado em circunstâncias complexas” (CHAM, 2014). Este Modelo responde bem às necessidades dos modelos estudados neste caso e, dos oferecidos pelo programa, é o mais

simples de usar, pois os demais modelos disponíveis precisam de programação manual dentro do arquivo de entrada do programa (q1). Finalmente, como modelo de turbulência, foi escolhido o LVEL, utilizado na maioria dos casos do FLAIR, pois é o modelo mais indicado quando se tem muitos objetos no domínio com uma malha com as características da usada para este estudo, e para problemas que envolvem a análise conjunta de escoamento de fluidos e transferência de calor.

Para definir o número de iterações foram realizados vários testes com um dos modelos mais complexos na sua solução (sala com aberturas em paredes opostas de 50% da área obrigatória para ventilação e o agrupamento fileiras). Desta forma, foi definido que o valor de 8000 iterações era apropriado para este estudo. Com este número de iterações é possível a obtenção de um valor com uma precisão aceitável para cada variável, com uma percentagem de erro fisicamente, pouco considerável, e com uma economia no tempo de computação razoável, alcançando tempos de simulação de, aproximadamente, 5 horas.

Cada elemento que compõe a sala de aula, paredes, piso, cobertura, janelas, móveis e usuários, foi inserido no modelo como objeto.

O piso, a cobertura e as paredes, em contato com outros ambientes internos, foram simulados como PLATES, elementos planos que não possuem espessura. Para estes elementos, a condição de *fonte de energia* predefinida (*default*) pelo programa, adiabática, não foi modificada.

As paredes em contato com o exterior e os vidros correspondentes à área de abertura para iluminação também foram modelados como PLATES, incluindo a opção “Fluxo de Calor da Superfície” na função *Fonte de energia*. Os valores em W/m^2 definidos para cada uma delas, correspondem à variável Fluxo de Calor fixo da tabela 7.

A janela de entrada de ar foi modelada como um objeto INLET. Este objeto permite atribuir uma temperatura inicial ao fluxo de vento, neste caso, igual à temperatura exterior dos contextos, e uma velocidade do vento em um dos vários eixos principais (x, y e z). No eixo y, foi definida a velocidade do vento, de acordo com cada caso (0.5, 1.0 ou 1.5 m/s), como componente negativo para indicar sua proveniência do norte. A função *External Radiative Link* (Vínculo com a Radiação Externa)

foi ativada, o que significa que a entrada de ar pode trocar calor por radiação com o ambiente exterior, e foi definida a temperatura exterior, de acordo com o contexto.

A saída de ar foi modelada como um objeto *OPENING*, objeto que permite o ingresso ou saída de ar, dependendo das pressões geradas pela força cinética do vento ou pela diferença de temperaturas entre o interior e o exterior. Para este, foi definida uma temperatura igual à temperatura exterior, para o caso em que ocorreria um ingresso de ar. Após ativar o *External Radiative Link*, foi definida a temperatura exterior, de acordo com o contexto.

Os móveis (mesas e cadeiras), foram modelados como objetos *BLOCKAGE*, objetos com massa e volume que compõem um obstáculo para o escoamento do ar. Para eles, foi definido um material sólido com baixa fricção, material definido por defeito (default) do programa.

O programa permite modelar os seres humanos, como um objeto *PERSON*. No entanto, este objeto é equivalente a uma fonte de calor, mas não representa um impedimento ao percurso do ar. De acordo com este dado, decidiu-se modelar os Usuários como objetos *BLOCKAGE*. Os materiais disponíveis para este tipo de objeto respondem a uma materialidade construtiva. Para inserir um novo material no programa, é preciso alterar seu arquivo de propriedades, com o auxílio de um código de programação. Por ser um programa de alta complexidade, e também devido à falta de conhecimento em programação, optou-se por escolher um material já disponível na biblioteca, e assim, modificar suas características.

O material escolhido foi o Poliestireno, material leve e liso. Como fonte energética, foi adicionado ao material um fluxo fixo de calor de 85.8 W (Tabela 7) e um coeficiente de transferência de calor. Conforme a Tabela 6 (Table 6), presente no capítulo de conforto térmico do ASHRAE HandBook (ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2003), para o corpo humano, na posição sentado, com presença de movimento de ar, este coeficiente é igual a 3.1, quando o vento tem uma velocidade entre 0.0m/s e 0.2m/s, e é igual à expressão (3), quando o ar tem uma velocidade entre 0.2 e 4.0 m/s. Por outro lado, a sua geometria foi definida como um objeto com forma humana na posição “sentado”, disponível no software.

$$hc = 8.3 \cdot V^{0.6} \quad (3)$$

Com base nos resultados iniciais da simulação dos seis casos bases (a sala base, com as três formas de distribuição da janela, nos dois contextos, e em estado de desocupação), para cada uma das velocidades de ar avaliadas, foi calculada a velocidade média de cada um.

Para os casos em que a velocidade média ultrapassava os 0.2m/s, a expressão (3) foi aplicada, e nos casos onde esta era menor, foi usado o valor 3.1W/m². A tabela 8 apresenta os coeficientes usados para cada caso.

Tabela 8. Coeficientes de convecção usados para o corpo humano em cada caso

Calculo do Coeficiente de Transferencia de Calor										
Variável		Caso 1			Caso 2			Caso 3		
		0.50	1.00	1.50	0.50	1.00	1.50	0.50	1.00	1.50
BRA	Velocidade Média	0.17	0.32	0.43	0.16	0.33	0.47	0.07	0.14	0.21
	Coef. De Trans. De Calor	2.87	4.19	5.00	2.76	4.27	5.28	1.68	2.55	3.25
COL	Velocidade Média	0.2	0.36	0.43	0.2	0.42	0.57	0.08	0.13	0.24
	Coef. De Trans. De Calor	3.16	4.50	5.00	3.16	4.93	5.92	1.82	2.44	3.53
V < 0.2										3.1

O modelo com uma distribuição da área de ventilação em fachadas de 50%, em duas fachadas opostas, é referenciado na tabela 8 como caso 1. Da mesma maneira, o caso 2 equivale à distribuição de área de ventilação em fachada de 50%, em duas fachadas adjacentes. Por fim, o caso 3, que corresponde à distribuição em fachada de 20% de área em uma fachada, e 80% da área na fachada oposta.

Como componente irradiante, foi atribuído ao corpo das pessoas uma emissividade de 0.98 e uma temperatura inicial de 30°C (Tabela 7).

Ao final, foram realizadas **72 simulações**, incluindo os usuários e suas formas de agrupamento dentro dos 6 casos base propostos, com modificações nas velocidades do vento.

3.3.2 Etapa 2: Processamentos dos dados e análise de resultados

3.3.2.1 Fase 1: Mapeamento dos valores

A visualização dos resultados das simulações foi realizada através do *GUI Post processor*, incluído no software, que permite representar cada variável em cores falsas, vetores e sólidos. A *Probe* é o elemento dentro do software que indica a localização do ponto que está sendo monitorado. Neste caso, esta foi localizada a uma altura de 0.60m sobre o piso, altura recomendada nos estudos de conforto térmico, para posicionar os transdutores que medem as variáveis ambientais em espaços de trabalho com a pessoa sentada (ISO, 1998), como no presente caso.

Uma vez obtidos os resultados para cada caso, o arquivo que contém a informação numérica das simulações (Arquivo “.phi”) foi inserido em um processador de dados numéricos, o Excel, onde foram mapeados os valores de cada variável.

3.3.2.2 Fase 2: Determinação das faixas de velocidades para avaliação

As Normas brasileiras e colombianas fazem referência a parâmetros de projeto como áreas mínimas de abertura para ventilação, e número de renovações de ar por hora, mas não especificam limites máximos ou mínimos de velocidade do ar. Dentro dos valores resultantes das simulações, uma infinidade de valores foram obtidos, razão pela qual, decidiu-se separar tais valores em 4 faixas.

Dentro da faixa 1, denominada faixa de velocidade baixa, foram contabilizados todos os valores entre 0.0 e 0.10m/s, compreendendo desde a inexistência de movimento de ar, até o limite das velocidades consideradas imperceptíveis para o ser humano. A segunda, denominada faixa de velocidades médias - baixas, abrange os valores compreendidos entre 0.11 m/s - velocidade do movimento do ar, que começa a ser percebida pelo ser humano - até 0.2 m/s- valor inicial da velocidade do ar, cuja velocidade começa a exercer uma melhoria na sensação

térmica dos usuários, segundo o modelo de velocidades do ar elevadas da ASHRAE.

Dentro da faixa 3, denominada Faixa de Velocidades Médias, serão considerados os valores de velocidade entre 0.21 e 0.80m/s, este último, definido como o limite superior da velocidade do ar em espaços internos, segundo a ASHRAE Standard 55 (2010).

Finalmente, à Faixa 4, Faixa de Velocidades superiores, pertencem todos os valores iguais ou superiores a 0.81m/s, que, segundo a literatura, é a velocidade que poderia apresentar problemas para a condução normal das atividades escolares, pelo voo de papeis devido à velocidade do ar .

Para cada modelo, foram obtidos 4 dados, referentes à percentagem de área do espaço que pertence a cada faixa de velocidade.

3.3.2.3 Fase 3: Percentagem de mudança da distribuição da velocidade do ar no plano de estudo

Os resultados foram divididos em grupos: segundo sua localização, Brasil e Colômbia, e posteriormente, de acordo com a forma de distribuição de janelas.

Cada um desses grupos adotou, como situação inicial, a distribuição do fluxo do ar nas 4 faixas, no espaço vazio (Caso Base). Foi avaliada, em cada grupo, a mudança entre as percentagens das faixas de velocidade, entre o espaço vazio e cada forma de agrupamento.

Uma vez obtidas as relações entre a variação dos valores iniciais das faixas no espaço vazio e as encontrados nas diferentes formas de agrupamento, foram geradas matrizes que permitiram comparar, para cada grupo, quais agrupamentos obtiveram maior diferença com a distribuição do vento inicial; qual distribuição de aberturas apresentou a maior e a menor percentagem de mudança nas diferentes formas de ocupação; e finalmente, se a diferença entre a área definida pela Norma colombiana NTC 4595 e o Caderno Técnico No. 4 teve uma influência considerável nessas mudanças.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos e gráficos obtidos na simulação dos modelos descritos nos itens anteriores. Inicialmente, são apresentados, em forma de tabelas, os mapeamentos dos valores de velocidade, resultantes de cada simulação, nas 4 faixas de velocidade.

Posteriormente, são apresentados os dados de cada agrupamento em comparação com o caso base, sem a presença de usuários. Da mesma forma, são analisadas as mudanças entre estes e os demais agrupamentos, e entre o mesmo caso, quando é variada a velocidade de entrada do ar. Ao final, são apresentadas as comparações realizadas entre os dados obtidos nos dois contextos de estudo.

4.1 CÓDIGOS E ABREVIACIONES ADOTADOS NA ANÁLISE DE RESULTADOS

Devido à grande quantidade de modelos e combinações de variáveis, foi desenvolvido um código para facilitar a identificação das diferentes simulações. Para facilitar a compreensão deste código, são apresentadas, na tabela 9, as abreviações que compõem cada código.

Tabela 9. Abreviações adotadas na Análise dos Resultados

Abreviações:

BRA, Bra	Brasil, Brasileiro	Contexto
COL, Col	Colômbia, Colombiano	
50-50 O	50% em duas fachadas Opostas	Distribuição da área de Janela em Fachada
50-50 A	50% em duas fachadas Adjacentes	
20-80	20% em uma fachada e 80% na outra	
Fila	Atividade Individual em Fileiras	Distribuição dos Usuários
Grupos	Atividade em Grupos	
Mredonda	Atividade coletiva em Mesa Redonda	

4.2 MAPEAMENTO DOS VALORES DE VELOCIDADE NAS 4 FAIXAS DE VELOCIDADE

Uma vez modelados e simulados os diferentes casos, foram obtidos os valores de velocidade em cada ponto da sala, a uma altura de 0.6m sobre o piso, para um total de 6000 valores por cada modelo simulado, de acordo com a malha definida. Devido à impossibilidade de comparar essa quantidade de dados com valores numéricos de grande variação, estes valores foram classificados em 4 faixas de velocidade, de acordo com o proposto na metodologia. Dessa forma, foi possível a identificação da percentagem da área total do plano de avaliação compreendida em cada faixa.

Uma vez simulada, para cada avaliação obteve-se um mapa de cores falsas, com a representação das faixas de velocidade na sua localização espacial sobre o plano de avaliação. A área para cada faixa foi contabilizada e sintetizada em um gráfico de barras 100% empilhadas, para sua comparação com as demais avaliações.

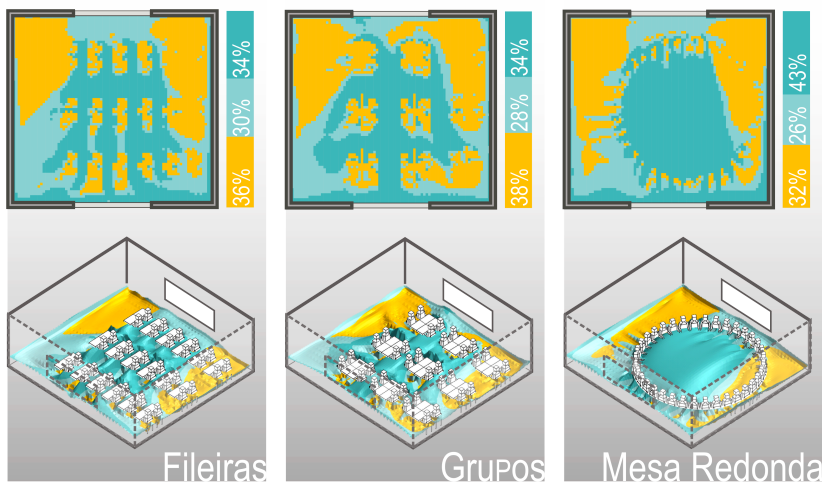
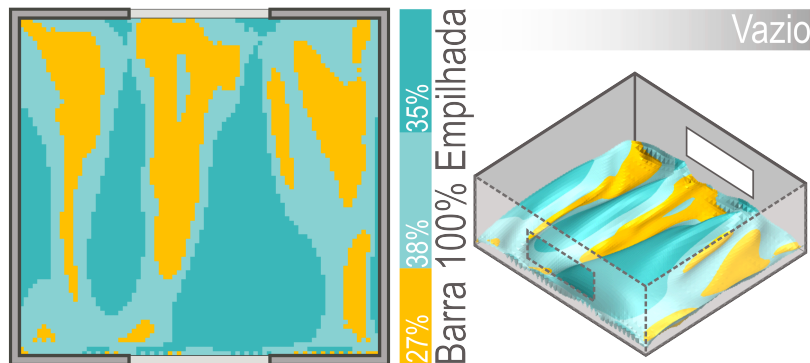
Foram obtidos um total de 72 mapas de cores falsas, correspondentes ao número de simulações realizadas. A figura 17 ilustra os mapas em cores falsas, as barras 100% empilhadas e uma representação espacial da distribuição das faixas de velocidade sobre o plano de estudo, para o caso 1 (50-50 O), do contexto brasileiro, quando a velocidade inicial do ar é 0.5m/s.

Caso 1

Vel. Inicial 0.5m/s

50-50 0

BRASIL

■ Faixa 1: 0.0-0.09m/s ■ Faixa 2: 0.1-0.19m/s ■ Faixa 3: 0.2-0.8m/s ■ Faixa 4: > 0.8m/s

Figura 17. Distribuição das faixas de velocidade no espaço, e ilustração tridimensional dos agrupamentos

4.2.1 Contexto brasileiro

O contexto tem grande influência nos resultados, pois dispõe as condições iniciais de cada um dos modelos simulados neste estudo. Para cada contexto, foram definidas as áreas de abertura em fachada para ventilação, de acordo com as normativas locais. Também foi definida a temperatura interior, de acordo com a temperatura exterior e o ganho de calor por radiação, obtidos de cada um dos lugares de referência. A seguir, são apresentados os valores encontrados nos modelos que compartilham as mesmas condições iniciais, determinadas pelo contexto brasileiro.

Nas figuras da 18 até a 20 e da 23 até a 25, a seguir, a faixa de velocidades baixas (Faixa 1) está representada pela cor amarela; a faixa de velocidades médias-baixas (Faixa 2) está representada com a cor azul clara e a de velocidades médias (Faixa 3) com a azul turquesa. A faixa de velocidades superiores (Faixa 4) está representada pelo azul escuro.

O cálculo da área do espaço que mudou de uma faixa para outra, entre o caso base e cada agrupamento, foi realizado com o intuito de se obter uma noção geral das mudanças totais que ocorrem entre o plano de avaliação no espaço vazio e no ocupado. Para manter um valor de 100%, o aumento em uma ou várias faixas, corresponde a uma redução proporcional nas demais, e vice-versa. Desta forma, para encontrar esta diferença total, foram somados os valores absolutos das diferenças (aumentos e reduções) entre as faixas de avaliação propostas, e posteriormente, foram divididos em 2. Esse valor percentual é representado nos gráficos com uma circunferência de cor cinza.

Da mesma maneira, para se ter uma noção do impacto do aumento da velocidade na distribuição inicial, referente à menor velocidade de entrada do ar (0.5m/s), foram calculadas as variações totais entre os 3 casos base. Esta diferença percentual é representada no gráfico da figura 18 através de um quadro laranja.

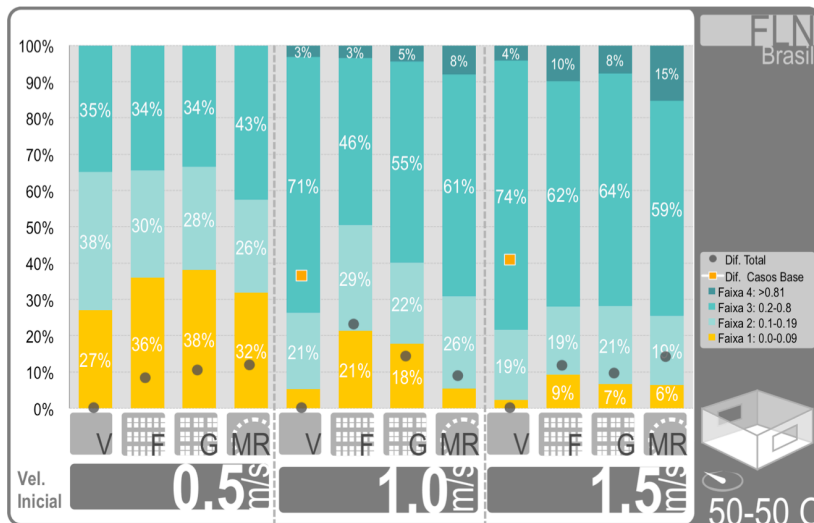


Figura 18. Caso 1 – Florianópolis BRA_50-50 O

Conforme ilustrado na figura 18, para uma velocidade inicial de 0.5m/s, que representa os dados encontrados para o Caso 1 (50-50 O), para uma velocidade de ingresso do ar igual a 0.5 m/s, observa-se que o espaço não apresenta valores de velocidade que superem 0.8m/s (valores nas primeiras 3 faixas de avaliação de velocidade). O caso base apresenta uma distribuição com percentagens similares para as faixas de velocidade 2 e 3, e uma percentagem menor para a faixa 1. Os agrupamentos apresentam distribuições similares do plano nas faixas de velocidade, com valores nas faixas de 1 e 3 semelhantes, sendo que a faixa 2 apresenta valores cerca de 10% menores.

Considerando a variação total, observam-se diferenças entre 9 e 13%, valores consideráveis em relação à distribuição inicial. No entanto, com uma diferença máxima entre agrupamentos de 4%, considera-se que, para esta velocidade de entrada, com esta distribuição de aberturas, a ocupação do espaço tem um impacto perceptível na distribuição do ar no plano de avaliação. Porém, a forma de agrupamento dos usuários não representa diferenças consideráveis.

Com a velocidade de entrada intermediária, aparecem áreas do plano classificadas em todas as faixas de velocidade, embora a faixa de velocidade 4 evidencie valores pequenos,

entre 3 e 8%. Com esta velocidade inicial, a maior parte do plano apresenta movimentação do ar perceptível para os usuários. A Mesa redonda evidencia um comportamento similar ao do espaço vazio, obtendo 10% de diferença, a menor variação nesta velocidade. Porém, a diferença na variação total entre as formas de agrupamento é considerável, obtendo valores com 15% de diferença entre uma e outra. A percentagem de variação mostra uma redução, em relação ao aumento do número de pessoas que há na unidade de agrupamento.

Para a máxima velocidade de entrada avaliada (1.5m/s), observa-se um comportamento parecido com a menor velocidade inicial (0.5m/s), obtendo distribuições similares nas faixas de velocidades, sem grandes diferenças percentuais entre os agrupamentos. A velocidade de entrada intermediária apresenta valores nas 4 faixas de velocidade, alcançando um valor de até 15% (MRedonda), que, dependendo da sua localização na sala, poderia apresentar uma situação de desconforto para as pessoas.

Pode-se observar que os agrupamentos Fileiras e Grupos apresentam comportamentos similares, efeito que pode ser produzido pela similaridade na estrutura de distribuição dentro do espaço. Ambas as distribuições possuem corredores entre os Agrupamentos, gerando um sistema semelhante de obstáculos ao percurso do vento, com diferenças somente entre o tamanho do obstáculo e a proximidade entre eles.

Quando comparados os valores percentuais das diferenças totais, obtidos para o caso base, com diferentes velocidades iniciais do ar, observa-se que, com um aumento de 0.5m/s à velocidade, 39% da área passa de uma faixa à outra. Com o aumento de 0.5m/s adicional, resultando em 1.5m/s de velocidade de entrada, 44% da área do plano de avaliação, muda de faixa. Considerando que o acréscimo da velocidade de entrada foi feito de forma linear, e a razão na qual aumenta a diferença total em relação ao valor anterior, conclui-se que à medida que a velocidade de entrada aumenta, a percentagem da área que muda de faixa diminui. Isto é evidenciado na considerável redução da diferença entre o valor obtido entre a velocidade inicial mínima e intermediária, 39%, e o valor encontrado entre a intermediária e a velocidade máxima avaliada, 5%. No entanto, devido aos cenários onde são localizados os centros de ensino e a possibilidade de controlar o

ingresso do ar fechando as aberturas, é pouco comum que existam velocidades de entrada maiores à maior velocidade utilizada neste estudo.

De forma geral, observando as diferenças totais entre os espaços vazios e os ocupados, salienta-se que a maior diferença percentual entre um agrupamento e seu respectivo caso base, foi encontrada para a distribuição em Fileiras, quando a velocidade é igual a 1.0m/s. A menor diferença também foi encontrada para este agrupamento, com a menor velocidade de ingresso de ar.

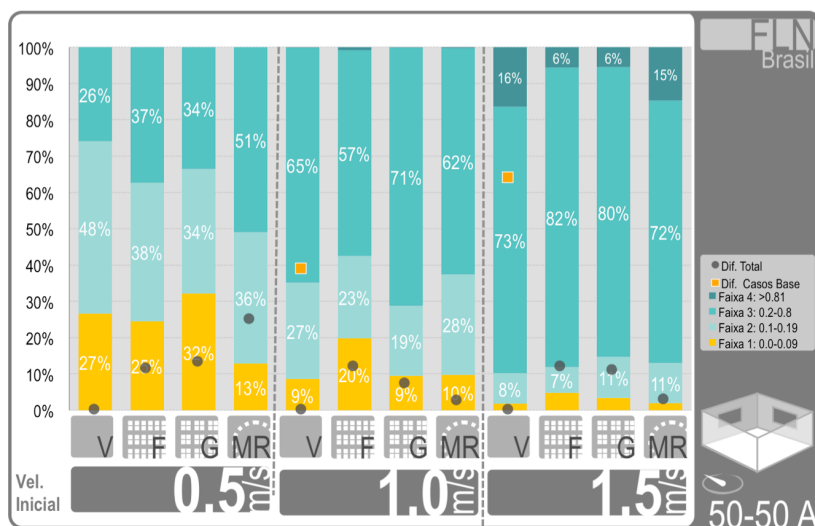


Figura 19. Caso 2 – Florianópolis BRA_50-50 A

Para o Caso 2 (50-50 A), com aberturas localizadas em duas fachadas adjacentes, para a menor velocidade de entrada do ar, o espaço apresenta valores nas 3 primeiras faixas de avaliação, comportamento similar ao Caso 1, descrito acima. O caso base exibe uma distribuição similar nas faixas 1 e 3, com 27% e 26%, respectivamente. A faixa 2 apresenta um valor de 48%, evidenciando que quase a metade da sala possui movimento de ar perceptível para os usuários, mesmo que este não proporcione uma melhoria na sensação térmica, em termos de conforto térmico.

Os agrupamentos em Fileiras e Grupos apresentam distribuições similares ao caso base, com diferenças totais entre

o espaço vazio e ocupado entre 11 e 13%. No agrupamento Mesa Redonda, por outro lado, observa-se uma redução considerável, de 14%, entre a sua faixa de velocidades 1, e a faixa correspondente no espaço vazio. Esta diferença é refletida em um aumento nas faixas de velocidade 2 e 3, aumentando-se a percentagem da área do plano com movimentação do ar perceptível para os usuários. Isto poderia resultar em uma melhoria perceptível na sensação térmica no espaço estudado, quando o espaço apresente temperaturas internas maiores.

Com o aumento da velocidade de entrada de 0.5 para 1.0m/s, a faixa de velocidades 3 apresenta um aumento considerável, tanto no caso base como nos modelos ocupados, em relação às distribuições nas faixas de velocidade observadas com a menor velocidade inicial, com valores entre 57 e 71%. O agrupamento em fileiras apresenta a maior percentagem da área do plano de estudo classificada na faixa de velocidade 1, com mais do dobro do valor do caso base. A maior parte da área do plano possui movimentação do ar, perceptível para o ser humano, mas para este caso, cerca de 70% dessa área possui velocidades que melhoram efetivamente a sensação térmica, segundo os valores definidos pela ASHRAE (2010).

Diferentemente do Caso 1, no Caso 2, apesar do aumento da velocidade inicial, apenas o agrupamento Fileiras apresenta valores na faixa de velocidades superiores, equivalentes a 1%.

Quando o espaço é avaliado com uma velocidade inicial de 1.5m/s, percebe-se uma redução, em maior proporção, na Faixa de velocidades 1, especialmente no caso base e com o agrupamento em Mesa Redonda. A faixa de velocidade 4 adquire valores percentuais consideráveis, alcançando percentagens de até 16%. Da mesma maneira, como ocorre no Caso 1, esta condição necessita de atenção, para não resultar no desconforto térmico de alguns dos ocupantes.

Para a velocidade de 1.5m/s e a velocidade intermediária de entrada de ar, 1.0m/s, a maior área do plano de avaliação apresenta valores de velocidade que se localizam na faixa de velocidade 3, faixa de velocidades médias, e apresenta baixos valores percentuais nas duas primeiras faixas. Isto permite concluir que o movimento do ar, com esta distribuição das aberturas, e uma velocidade de incidência do vento relativamente alta (1.0 e 1.5 m/s), permite que o movimento do ar seja percebido na maioria dos pontos do plano.

Considerando a diferença entre as distribuições iniciais nas faixas de avaliação do caso base, sob diferentes velocidades de entrada, percebe-se que, quando a velocidade inicial é 1.0m/s, a diferença total em relação à velocidade de entrada inicial é igual à obtida no caso 1, 39%. No entanto, ao aumentar 0.5m/s a esta velocidade, resultando em uma velocidade inicial total de 1.5m/s, a diferença total entre as distribuições nas faixas da velocidade intermediária e máxima é consideravelmente maior do que no caso base anterior. Porém, se mantém a condição de que tal diferença é consideravelmente menor que aquela apresentada entre a menor velocidade de entrada e a velocidade de 1.0m/s.

Observando a diferença total entre os agrupamentos e seu respectivo caso base, constata-se que, para esta distribuição de fachada, a maior diferença percentual é alcançada pelo agrupamento Mesa Redonda, com uma velocidade inicial de 0.5m/s. Assim como no caso anterior, o agrupamento que alcança a maior diferença é também o agrupamento com menor diferença em relação ao caso base, quando modificada a velocidade de entrada do ar. Para a velocidade inicial intermediária e maior, a distribuição em Mesa Redonda apresenta 3% de diferença com o espaço vazio, quando este é avaliado com essas velocidades iniciais.

As distribuições dos usuários em Fileiras e Grupos apresentam variações totais similares para as velocidades 0.5 e 1.5m/s. Mesa Redonda, por outro lado, possui uma diferença entre 4 e 14% em relação aos outros agrupamentos, obtendo a maior mudança quando comparado com o caso base. Para a velocidade de entrada intermediária, igualmente ao Caso 1, evidencia-se uma redução entre a diferença da distribuição nas faixas de velocidade do caso base com as dos agrupamentos, na medida em que aumenta o número de pessoas por unidade de agrupamento.

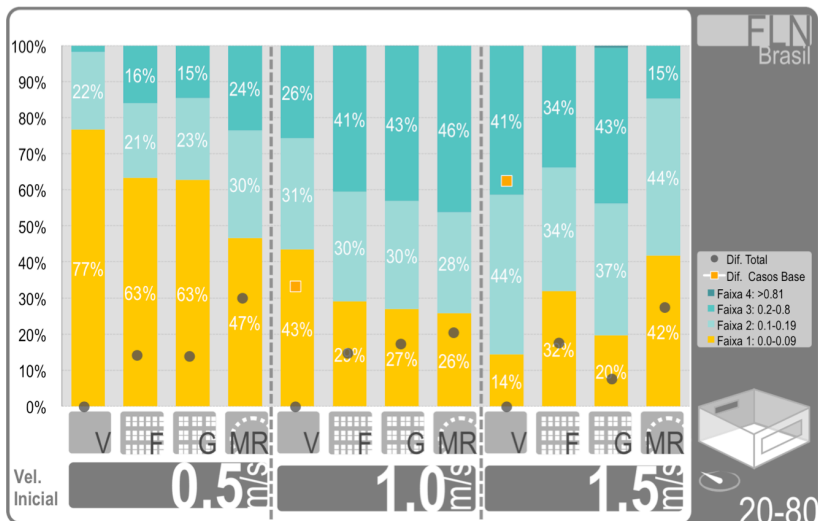


Figura 20. Caso 3 - Florianópolis BRA_20-80

Segundo o ilustrado pela figura 20, o Caso 3, possui uma abertura de entrada menor do que a de saída, apresentando uma condição inicial diferente da encontrada nos Casos 1 e 2. Com uma velocidade inicial do ar de 0.5m/s, a maior parte da área do plano base pertence à mesma faixa de velocidade, com 77% na faixa 1. Quando o espaço é ocupado, esta faixa de velocidade diminui, incrementando, proporcionalmente, a área do plano que apresenta movimentação do ar perceptível para os usuários. No entanto, a predominância da faixa de velocidade 1 se mantém para todas as avaliações, com esta velocidade inicial.

Com o incremento da velocidade inicial, não se observam percentagens da área do plano de estudo, com valores classificados na faixa de velocidades 4.

Para a velocidade de entrada intermediária, o caso base apresenta valores percentuais parecidos, para as faixas de velocidade 2 e 3. Em relação ao caso base, com a menor velocidade inicial do ar, a faixa de velocidades 1 apresenta uma redução considerável no seu valor percentual. Quando o espaço é ocupado pelos alunos, a redução nesta faixa é ainda maior, incrementando-se da mesma maneira, a percentagem da área do plano que pertence à faixas de velocidade com movimentação do ar perceptível.

Quando a velocidade de entrada de ar é definida como 1.5m/s, o caso base apresenta uma distribuição atípica das faixas de velocidade na área do plano, quando comparada às duas velocidades de entrada anteriores. Para esta avaliação, a maior parte da sala (aproximadamente 85%) apresenta movimentação do ar perceptível para os usuários, com 44% na faixa 2 e 41% na 3. O menor valor é obtido para a faixa de velocidade 1, neste caso.

Devido a esta condição inicial da distribuição da área do plano nas faixas de velocidade, quando o espaço é ocupado, a distribuição do vento nas faixas de avaliação apresenta um comportamento irregular, quando comparado com a tendência dos modelos com as outras velocidades de entrada de ar (0.5 e 1.0 m/s). Para as 3 formas de agrupamento, o valor percentual da faixa de velocidade 1 aumenta entre 5 e 27%, em comparação com o valor do caso base, obtendo-se o maior valor percentual no agrupamento Mesa Redonda. A maior parte da área do plano mantém velocidades do ar perceptíveis para os usuários.

Para os Casos 1 e 2, que possuem aberturas de entrada e saída do ar do mesmo tamanho, a distribuição em Mesa Redonda apresenta condições similares às encontradas no espaço vazio (Caso Base). No entanto, para esta distribuição em fachada, com uma área de entrada menor do que a de saída, o agrupamento Mesa Redonda apresenta maior diferença na distribuição das faixas de avaliação, em relação ao Caso Base. Observam-se maiores velocidades de ar no plano de avaliação, para as duas primeiras velocidades iniciais (0.5 e 1.0m/s), e um comportamento oposto ao do caso base, para a maior velocidade de entrada.

A diferença apresentada no comportamento da distribuição da área do plano nas faixas de velocidade para este agrupamento (MRedonda), em relação ao caso base, para o Caso 3, e, em geral, para todas as avaliações realizadas com a distribuição da área de abertura em fachada 20-80, deve-se, não só à diferença no tamanho dos vãos, mas também ao desnível entre eles, ou seja, a qual altura estão localizados na parede, um em relação ao outro.

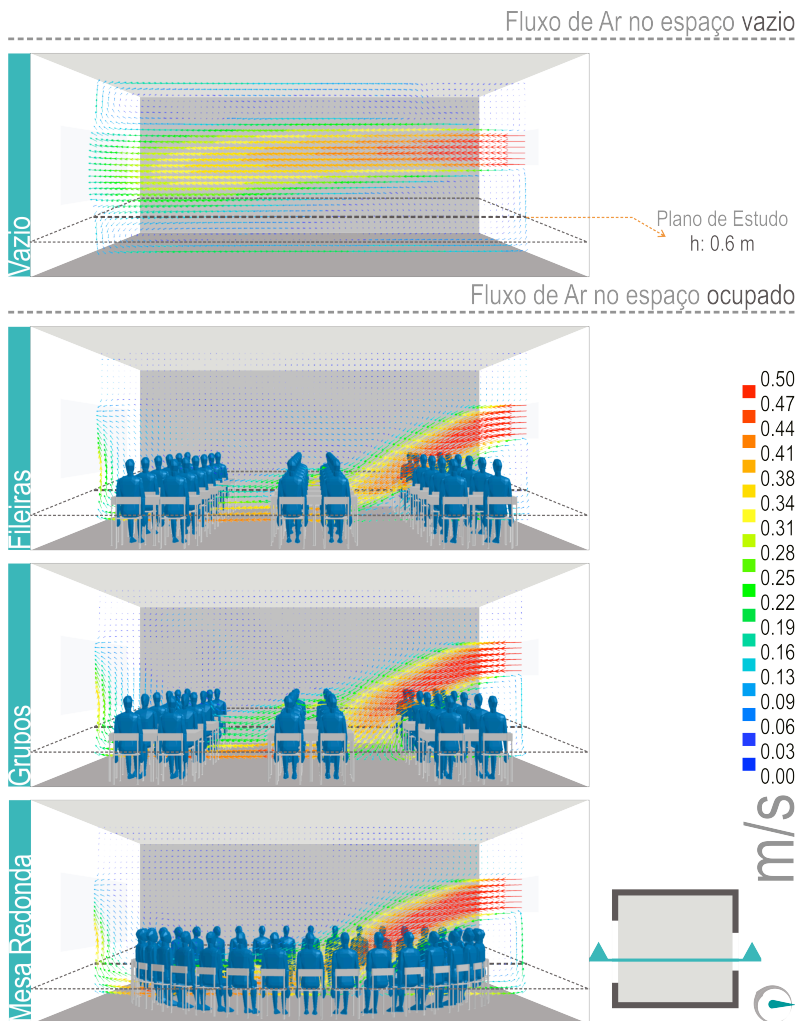


Figura 21. Fluxo de ar no espaço vazio e ocupado, com uma distribuição de aberturas em fachadas 20-80 em paredes opostas e uma velocidade inicial de 0.5m/s, considerando o aporte de calor do corpo dos usuários

A localização da janela de entrada provoca um fluxo descendente, apresentando maior movimentação do ar em alturas superiores àquela na qual está localizado o plano de avaliação. A presença dos usuários, que adiciona ao ambiente o calor emitido pelo corpo humano, produz que o ar em torno deles

se aqueça e suba, criando zonas de baixa pressão ao seu redor, fato que acentua o descenso do fluxo. Razão pela qual, podem resultar maiores valores de velocidade nas distribuições no plano, com o espaço ocupado. As figura 21 e 22 ilustram este caso, representando o fluxo de ar em um corte do espaço, vazio e ocupado, com e sem o aporte de calor dos usuários.

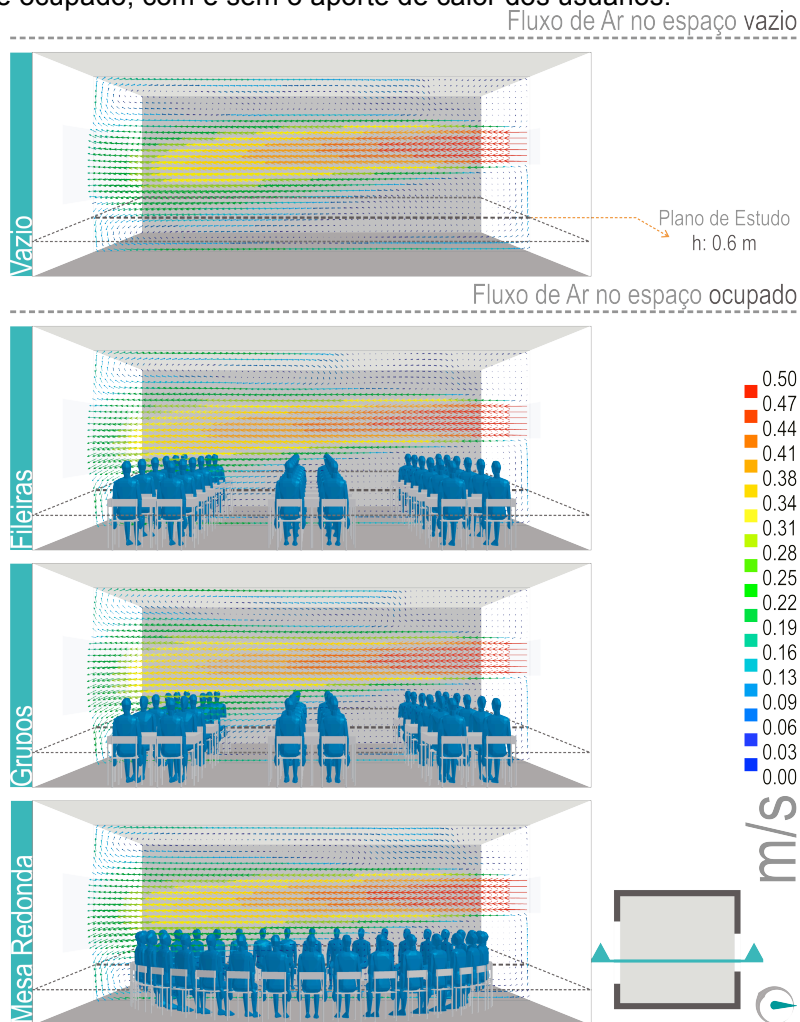


Figura 22. Fluxo de ar no espaço vazio e ocupado, com uma distribuição de aberturas em fachadas 20-80 em paredes opostas e uma velocidade inicial de 0.5m/s, sem considerar o aporte de calor do corpo dos usuários

Quando comparadas as distribuições do plano, nas faixas de avaliação no caso base, com velocidades diferentes, obteve-se que, entre a menor velocidade de entrada do ar e a velocidade intermédia, tem-se uma diferença total de 33%. A diferença entre a velocidade intermediária e a maior é de 29%.

No Caso 3, para todas as velocidades iniciais do ar, observam-se grandes variações na distribuição do plano de trabalho quando a sala é ocupada. Para as duas velocidades iniciais, os agrupamentos em Fileiras e Grupos apresentam comportamentos similares em relação ao espaço vazio. O agrupamento Mesa Redonda apresenta a maior diferença quando comparado com o caso base, mantendo esta condição para as 3 velocidades de entrada, em oposição ao que ocorre nas outras duas distribuições das aberturas em fachada. A menor diferença foi observada para a velocidade 1.5 m/s, no agrupamento em Grupos.

Para todos os casos, a distribuição em Grupos apresenta o valor intermediário para muitas das avaliações realizadas. No estudo realizado por Ahmed, Ahmad e Rahim (2010), referenciado na fundamentação teórica deste trabalho, a eficiência da ventilação aumenta com a redução do tamanho do obstáculo, e vice-versa. Analisando os agrupamentos nessa perspectiva, o agrupamento em Grupos apresenta os obstáculos mais esparsos ao fluxo do ar, com agrupamentos mais compactos, e com maior distância entre os obstáculos. Esta pode ser a razão pela qual este agrupamento representa as menores diferenças ou as diferenças intermediárias para muitas das avaliações feitas nos 3 casos, localizados neste contexto.

Com o intuito de se fazer uma comparação da influência que os diferentes parâmetros de desenho e variáveis de simulação possuem, nas diferenças totais, entre o espaço vazio e ocupado, foi calculada a percentagem média para cada característica. por exemplo, para encontrar a percentagem média da diferença total entre os casos base e os espaços ocupados pelos usuários em uma distribuição em fileiras, foi realizada uma média de todas as diferenças totais dos modelos com este tipo de agrupamento, independentemente da distribuição de aberturas em fachada e da velocidade inicial do fluxo do ar que entra no espaço. A Tabela 10 apresenta os valores percentuais médios, para cada agrupamento, velocidade inicial do ar e distribuição das aberturas em fachada.

Tabela 10. Valores médios das variações para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto, contexto brasileiro



Conforme a tabela 10, para o contexto Brasileiro, os agrupamentos que apresentam as maiores e menores diferenças em relação ao caso base, são Mesa Redonda, com uma percentagem média de 16%, e Grupos com 12%. A distribuição das aberturas em fachada que teve menor impacto na distribuição inicial da área nas faixas de avaliação foi a que apresenta janelas iguais, localizadas em paredes adjacentes (Caso 2). A que apresentou maior influência foi a distribuição com janelas de entrada e saída de tamanhos diferentes (Caso 3). Enquanto às velocidades iniciais de entrada do ar, quando a velocidade inicial aumenta, a diferença do espaço vazio em relação ao espaço ocupado se reduz, apresentando uma relação inversa.

4.2.2 Contexto colombiano

A mudança de contexto implica um reajuste no tamanho das aberturas. Segundo a Normativa colombiana, as aberturas para ventilação devem ser equivalente a 1/6 da área do piso, para as características climáticas da cidade de referência, Medellín. A Normativa brasileira exige uma abertura de 1/8 da área do piso. Desta forma, para o contexto colombiano, as

aberturas são aproximadamente 25% maiores do que no contexto brasileiro. Da mesma forma, embora não seja uma diferença muito significativa, este contexto possui uma temperatura média 1°C maior. Neste item, apresentam-se os valores encontrados nos modelos que compartilham as mesmas condições iniciais, determinadas pelo contexto colombiano.

Conforme enunciado no item anterior, nos gráficos 23, 24 e 25, a faixa de velocidades baixas está representada pela cor amarela; a faixa de velocidades médias baixas está representada com a cor azul clara, e a de velocidades médias, com a azul turquesa. Finalmente, a faixa de velocidades superiores está representada pelo azul escuro.

Da mesma forma que no contexto anterior, as variações totais entre o caso base e os agrupamentos estão representadas com uma circunferência cinza, e a diferença entre a distribuição inicial do plano no caso base, com diferentes velocidades de entrada, está representada com um quadro laranja.

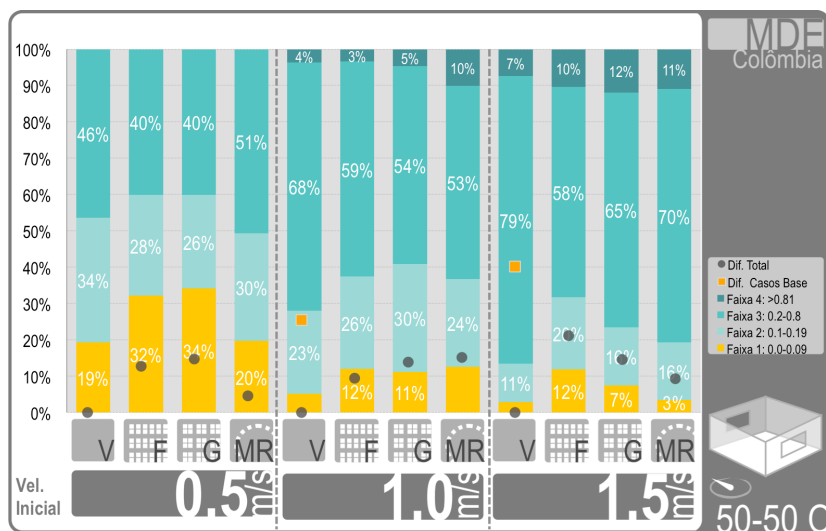


Figura 23. Caso 1 – Medellín COL_50-50 O

De acordo com o ilustrado na figura 23, para o Caso 1 (50-50 O), localizado no contexto colombiano, com uma velocidade inicial do ar de 0.5m/s, a área do plano de avaliação apresenta valores de velocidade menores que 0.8m/s. Da mesma maneira

que no caso 1, localizado no contexto brasileiro, esta distribuição de fachada apresenta, para esta velocidade inicial, uma distribuição do plano de estudo nas faixas de velocidade, cuja maior parte da área possui velocidades perceptíveis para os usuários. Os agrupamentos em Fileiras e Grupos apresentam um aumento de cerca de 15% na faixa de velocidade 1, e valores percentuais muito próximos para todas as faixas. Mesa Redonda apresenta, na sua distribuição, valores semelhantes aos do caso base.

Quando a velocidade de entrada do ar é aumentada, observam-se valores compreendidos na faixa de velocidade 4. Com a velocidade inicial intermediária, todas as avaliações apresentam uma redução considerável no valor percentual da faixa 1, em relação à velocidade de entrada de ar anterior, não obtendo valores que ultrapassam 12%. A maior parte da área do plano está localizada entre as faixas de velocidade 2 e 4, com valores percentuais similares para cada forma de ocupação. Os agrupamentos apresentam diferenças totais, em relação ao caso base, muito similares, com valores entre 9 e 15%.

Para a máxima velocidade de entrada avaliada, 1.5m/s, a faixa de velocidade 1 apresenta uma redução ainda maior em relação à menor velocidade de entrada. Esta faixa apresenta valores similares e, em alguns casos, menores que as percentagens da área do plano, que possui valores na faixa de velocidade 4. Para as 4 formas de ocupação, o espaço vazio e os três agrupamentos, a faixa de velocidades 3 tem mais da metade da área do plano, sendo a faixa predominante para todas, com esta velocidade inicial do ar. As variações totais entre o espaço vazio e os agrupamentos se reduzem, à medida que o número de pessoas por unidade de agrupamento aumenta.

Conforme observado em casos anteriores, as diferenças na distribuição do plano nas faixas de avaliação, no espaço vazio, têm grandes mudanças com o incremento da velocidade inicial. Quando é aumentado o valor inicial da entrada do ar de 0.5 para 1.0m/s, o plano apresenta 26% da sua área em uma faixa diferente daquela, na qual estava localizado na primeira velocidade de entrada do ar. Como foi observado no contexto brasileiro, com o aumento da velocidade de entrada do ar de 1.0m/s a 1.5m/s, aumenta a diferença total na distribuição do plano, em relação a velocidade de entrada mínima avaliada, com 40% de diferença. No entanto, a diferença na proporção na que

essa diferença total aumenta entre uma velocidade inicial de entrada e outra, diminui.

Observando os valores de diferença totais, percebe-se que o agrupamento que apresentou maior diferença em relação ao seu correspondente caso base é Fileiras, com uma velocidade inicial de 1.5m/s. A distribuição dos usuários em Mesa Redonda apresenta a menor variação com relação ao seu caso base, quando a velocidade inicial do ar é 0.5m/s.

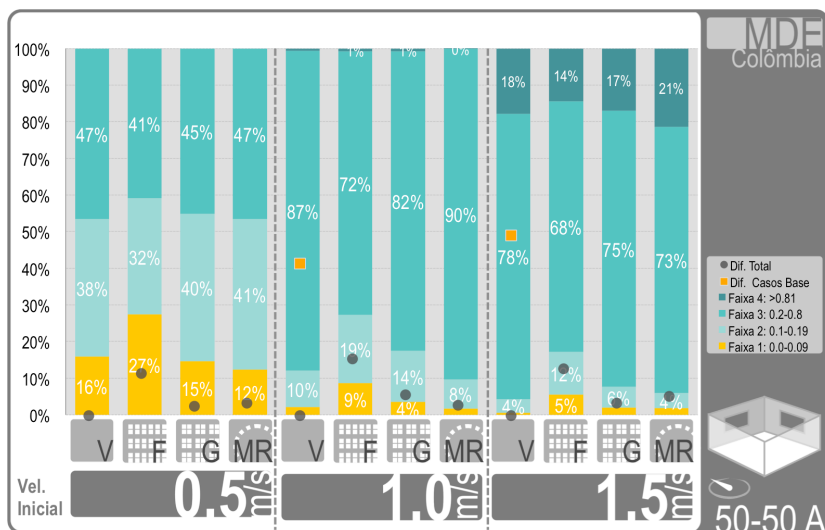


Figura 24. Caso 2 – Medellín COL_50-50 A

Para o Caso 2, com aberturas iguais localizadas em paredes adjacentes, observa-se um comportamento da distribuição da área do plano nas faixas de velocidade, similares ao apresentado no Caso 1 deste contexto. Para a menor velocidade inicial, a faixa de velocidade 1 apresenta o menor valor percentual, e valores similares para a 2 e a 3. O agrupamento Fileiras apresenta um aumento na faixa de velocidade 1, em relação ao caso base, enquanto os demais agrupamentos apresentam uma redução pouco considerável, entre 1 e 4%.

Com o aumento da velocidade para as velocidade inicial intermediária e máxima avaliadas, a faixa de velocidade 1 apresenta uma redução considerável, apresentando valores

mínimos nas faixas, para alguns dos casos. Com uma velocidade de entrada relativamente alta, mais de 65% da área do plano pertence à faixa de velocidade 3. E mais de 90% possui movimento do ar perceptível para os usuários.

Para a velocidade intermediária, os valores obtidos pela faixa de velocidade 4 podem ser desconsiderados, pois não atingem nem 1%. Por outro lado, em todas as formas de ocupação, com uma velocidade de 1.5m/s, esta faixa de velocidade apresenta valores percentuais maiores a 10%, atingindo até 20% em alguns agrupamentos. Esta condição poderia aumentar a possibilidade de desconforto para as condições climáticas avaliadas neste estudo, que apresenta temperaturas médias moderadas.

O caso base, com diferentes velocidades de entrada do ar, apresenta uma variação de 40% entre a menor velocidade de entrada e a velocidade inicial intermediária. A maior velocidade de entrada apresenta uma variação de 49% quando comparada com a menor, e uma diferença de 9% em relação à intermediária.

Para todas as avaliações realizadas para o Caso 2, no contexto colombiano, constatou-se que, as variações, na distribuição do plano de avaliação, entre o espaço vazio e os agrupamentos, são relativamente pequenas, com uma diferença máxima de 15% no agrupamento em Fileiras, para a velocidade de entrada do ar intermediária. Para todas as velocidades, este agrupamento apresentou as menores variações. Grupos e Mesa Redonda, por exemplo, não obtiveram variações que ultrapassaram 6%.

Acredita-se então, que com uma distribuição 50-50 em paredes adjacentes, a diferença entre a distribuição do plano no espaço vazio e ocupado pode ser desconsiderada em salas de ensino que sejam exclusivamente usadas para atividades coletivas. No entanto, sendo o objeto deste estudo uma sala de aula típica, usada para atividades de ensino que na maioria das vezes respondem a um modelo de aula expositiva, as variações apresentadas pelo agrupamento Fileiras são consideráveis.

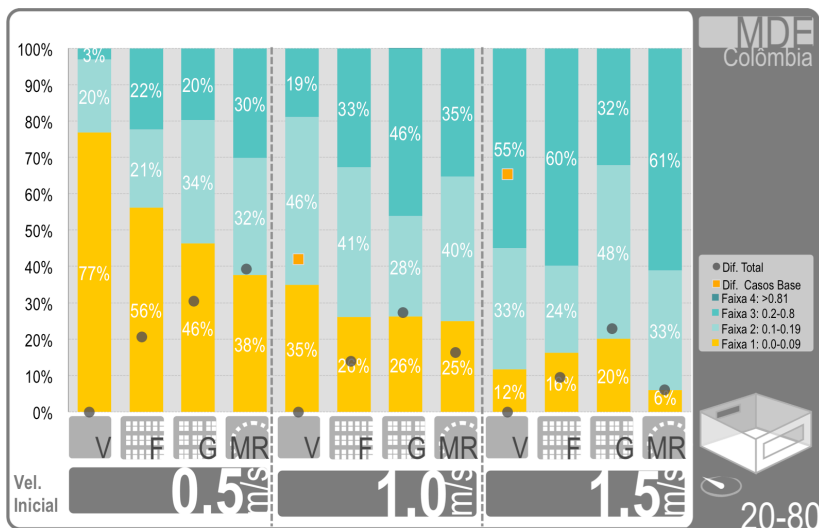


Figura 25. Caso 3 – Medellín COL_20-80

Mesmo com uma diferença considerável no tamanho das aberturas, o Caso 3 apresenta um comportamento similar ao apresentado no contexto brasileiro. Não se observam percentagens da área do plano pertencente à faixa de velocidade 4, para nenhuma das velocidades iniciais. O caso base, para a menor velocidade de entrada, apresenta uma distribuição nas faixas de velocidade muito similares, com 77% da área do plano na faixa de velocidade 1, e 23% com movimentação do ar perceptível para os usuários. Quando o espaço é ocupado pelos alunos, a faixa de velocidade 1, decresce notavelmente, aumentando sua diferença para os agrupamentos coletivos, até chegar à distribuição em Mesa Redonda, onde as 3 faixas de velocidades apresentam percentagens similares.

Com o aumento da velocidade de entrada, observa-se uma menor percentagem na faixa de velocidade 1, e maior área do plano nas faixas de velocidade 2 e 3. Similar ao contexto brasileiro, para uma velocidade inicial de 1,5m/s, o caso base exibe a menor percentagem na primeira faixa, apresentando na maioria da área do plano, movimentação do ar perceptível para os usuários. Gerando desta maneira, uma referência ao caso base, atípica para este caso, evidenciando então, um aumento percentual na faixa de velocidade 1 para alguns dos

agrupamentos, todavia mantendo para todos, uma predominância das faixas 2 e 3, que possuem velocidades perceptíveis para os usuários.

A variação entre a distribuição nas faixas do plano de avaliação no caso base, com a menor velocidade de entrada e com as velocidades de entrada intermediária e máxima, são significativas. Entre a menor velocidade de entrada e a intermediária, há uma variação de 42%, que é incrementada em 23%, quando é aumentada a velocidade inicial para 1.5m/s.

A forma de distribuição em Grupos apresenta a maior diferença percentual em relação à distribuição do plano de avaliação no espaço vazio, para as velocidades de entrada intermediárias e máxima avaliadas, mas mantendo valores percentuais similares nas 3 velocidades de entrada (30, 27 e 23%). Mesa Redonda apresenta, para o Caso 3, a maior diferença com o caso base, com uma velocidade de entrada de 0.5m/s, e a menor diferença com a velocidade de entrada máxima.

Realizando o mesmo exercício para obter uma noção geral das mudanças totais entre o plano de avaliação no espaço vazio e no ocupado, foram reunidas, na tabela 11, os valores de variação média para cada agrupamento, velocidade de entrada e distribuição das aberturas em fachada.

Tabela 11. Valores médios das variações para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto, contexto colombiano.

Agrupamento	14%	15%	11%
	13%	7%	21%
	16%	13%	12%
Distribuição de Abertura em Fachada			
Velocidade Inicial de entrada de Ar	0.5	1.0	1.5

Conforme a tabela 11, o agrupamento que apresentou maior variação neste contexto é Grupos, com uma diferença média de 15%. Mesa Redonda mostra ser o agrupamento com menor impacto, com 11%. Contudo, as diferenças nas percentagens entre os agrupamentos não são consideráveis, permitindo concluir que, independente da forma de ocupação, a distribuição do plano de avaliação apresenta uma variação em torno de 13%, quando o espaço é ocupado pelos usuários.

Na distribuição das aberturas em fachada, observa-se que, similar ao contexto brasileiro, a distribuição em fachada com duas janelas iguais, localizadas em paredes adjacentes, apresenta a menor variação, e aquela com tamanhos diferentes de aberturas de entrada e saída, a maior. Da mesma maneira, no contexto colombiano, observa-se uma redução na variação entre o espaço vazio e ocupado, quando é aumentada a velocidade inicial do ar.

4.2.3 Diferenças produzidas pelos parâmetros de projeto definidos pelo contexto

Como enunciado anteriormente, a mudança de um contexto para outro implica dois tipos de alterações nas características dos modelos. As velocidades de entrada do ar, as formas de agrupamento e a proporção da distribuição da área aberta em fachada, são mantidas. No entanto, embora seja mantida a proporção, o contexto colombiano possui aberturas maiores para o ingresso de ar, segundo os parâmetros definidos pela Norma colombiana. Da mesma maneira, há uma leve mudança na temperatura interior e exterior (1°C), que é produto do clima dos lugares de referência.

A mudança destas características dificulta a comparação entre os contextos. No entanto, considerando que uma diferença de 1°C entre as temperaturas exteriores e interiores do espaço nos contextos, influencia, mas não apresenta condições térmicas incompatíveis. É apresentada, a seguir, a soma das percentagens da área do plano que pertencem as faixas de velocidade 2 e 3, em relação à área de abertura determinada pelo contexto. A soma destas faixas apresenta a quantidade de área do plano que possui velocidades, as quais podem resultar em uma melhoria na sensação térmica, sem o risco de apresentar desconforto, em termos de contorto térmico.

Da mesma maneira, são apresentadas as percentagens da área com valores na faixa 4, para ressaltar a possibilidade de desconforto nas salas de aula avaliadas, por correntes de ar localizadas ou inconvenientes, pela sensação de olhos secos ou o voo de papéis, produzida pela movimentação do ar.

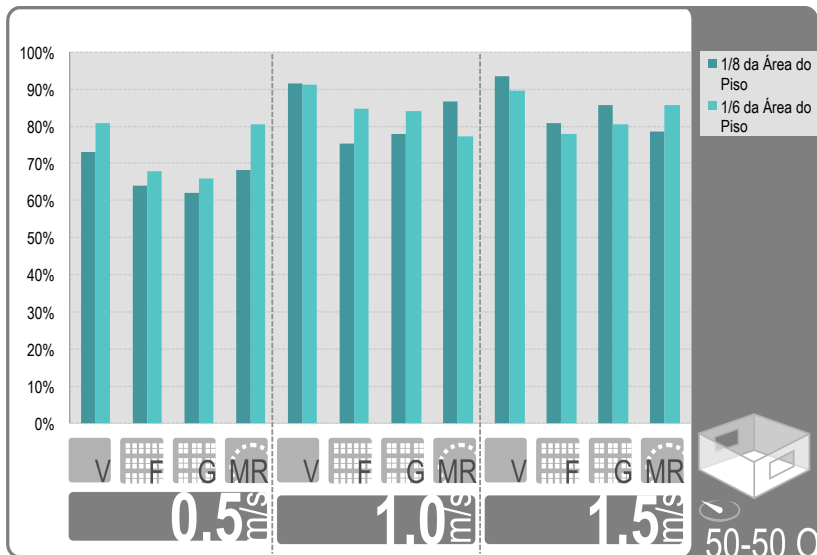


Figura 26. Comparação entre a soma das percentagens pertencentes às áreas do plano de estudo, com valores nas faixas de velocidade 2 e 3, para o Caso 1

A figura 26 apresenta os valores equivalentes à soma das faixas 2 e 3 do Caso 1, para cada contexto de estudo, de acordo com a sua área de abertura em fachada, 1/8 da área de piso para Brasil e 1/6 da área de piso no caso da Colômbia. Este valor foi calculado com o intuito de ilustrar as diferenças geradas pelas características ambientais e de projeto, resultado dos parâmetros de projeto da normativa dos contextos, especialmente as diferenças mais significativas - como a área das janelas.

Observa-se que, mesmo o contexto colombiano apresentando uma área adicional de 25% nas aberturas, a diferença entre as percentagens obtidas para a soma das duas faixas de velocidade não é muito significativa entre os contextos. Para a menor velocidade de entrada do ar, observam-se maiores diferenças entre as áreas definidas para os contextos, alcançando uma diferença máxima de 12%. Com o aumento da velocidade, as diferenças vão se tornando ainda menores, e para alguns agrupamentos, a área de janela menor ultrapassa a percentagem da maior.

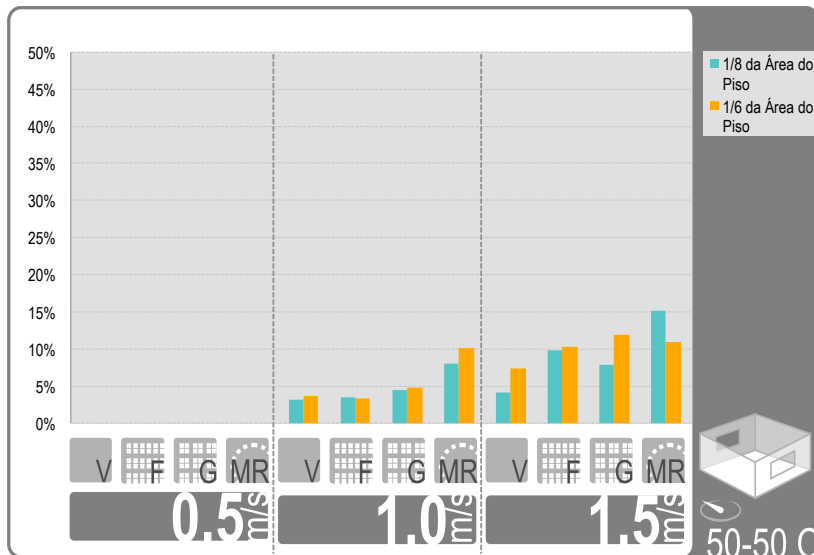
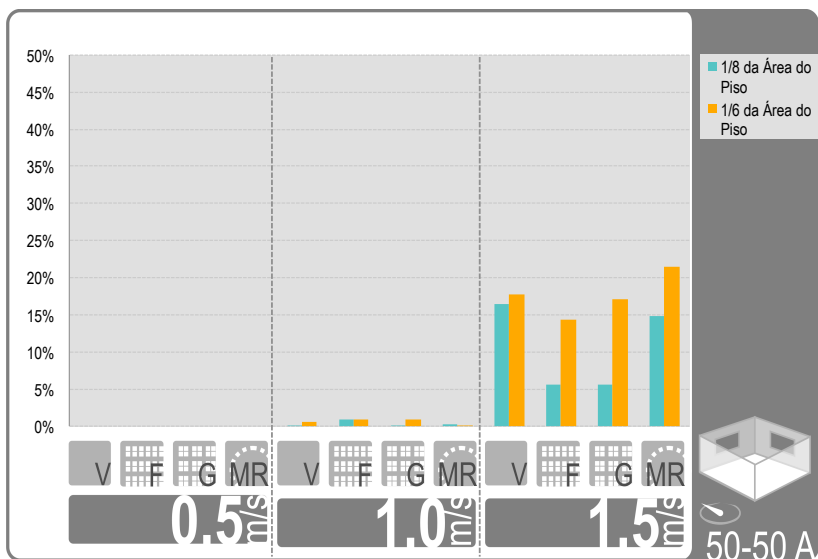
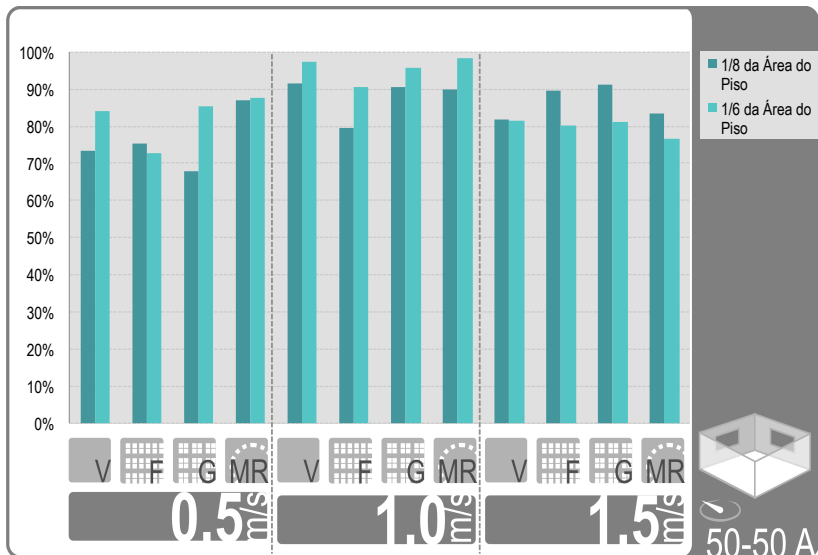


Figura 27. Comparação das percentagens obtidas para a faixa de velocidades 4, em cada contexto, para o Caso 1.

Conforme a figura 27, as percentagens da área do plano que possuem valores de velocidade acima do recomendado pela ASHRAE (2010), não apresentam grandes diferenças para o Caso 1, entre os contextos, com variações máximas em torno de 4%.

O Caso 2 apresenta condições similares às do Caso 1, conforme o ilustrado na figura 28. Porém, observam-se maiores diferenças entre contextos, alcançando um máximo de 15% para o agrupamento em grupos, na menor velocidade inicial do ar. A velocidade de entrada intermediária apresenta valores similares para todas as formas de ocupação do espaço. No entanto, o contexto colombiano apresenta para todas, uma percentagem maior. A máxima velocidade de entrada do ar, produz o efeito contrário, obtendo-se, para os 3 agrupamentos, percentagens maiores para a menor área de abertura. Esta diferença pode ser produto da mudança de direção do vento, produzida pela distribuição das janelas em fachadas adjacentes, característica particular deste caso, e às zonas de recirculação de ar, que podem aparecer no espaço.



Da mesma forma, embora se observem diferenças pequenas entre as percentagens pertencentes à faixa de velocidade 4, para a velocidade de entrada intermediária, e inexistentes para a menor, a máxima velocidade inicial avaliada apresenta diferenças de mais de 10% entre os contextos, para os agrupamentos em Fileiras e Grupos. Esta condição requer cuidado, devido aos valores totais presentes na faixa 4 de velocidade, para evitar o possível desconforto dos usuários.

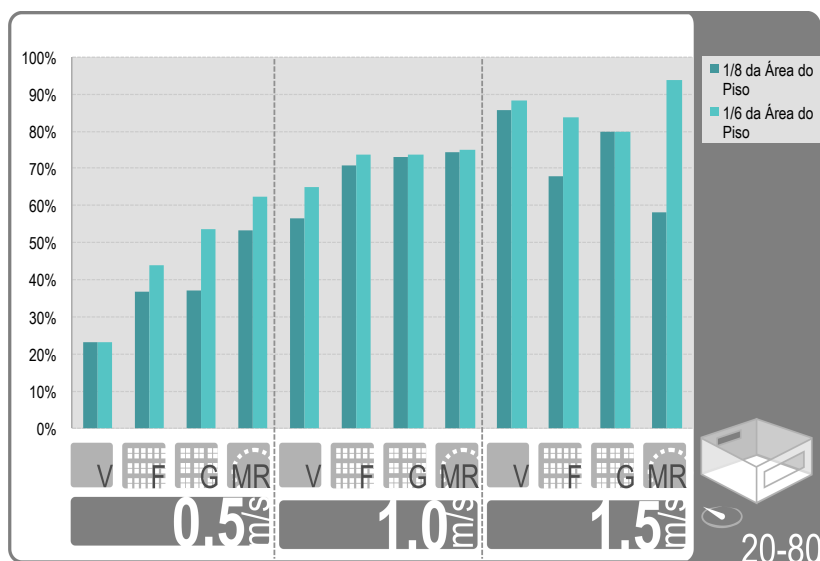


Figura 30. Comparação entre a soma das percentagens pertencentes às áreas do plano de estudo, com valores nas faixas de velocidade 2 e 3, para o Caso 3

No Caso 3, segundo o observado na figura 30, para uma distribuição em fachada com janelas de entrada e saída de tamanhos diferentes, um aumento na área das aberturas possui maior influência do que nos casos com aberturas iguais. Para a menor e a maior velocidade de entrada do ar, os casos base apresentam valores similares para a soma das faixas de velocidade 2 e 3. Com a ocupação do espaço, observam-se maiores diferenças entre os contextos, chegando até a uma diferença máxima de 36%, no agrupamento Mesa Redonda com a máxima velocidade de entrada avaliada. Na velocidade inicial intermediária, ocorre o caso contrário, apresentando-se uma leve

diferença de 8%, entre os casos base, e valores muito similares para os agrupamentos.

Como foi observado em itens anteriores, esta distribuição das aberturas em fachada não apresenta percentagens da área do plano de estudo na faixa 4. É interessante ressaltar que um aumento na área das aberturas, com esta proporção, pode incrementar a área de movimentação do ar perceptível para os usuários, sem aumentar o risco de desconforto pelo aumento da faixa de velocidade 4.

4.2.4 Considerações finais sobre os resultados

O propósito deste estudo foi avaliar a relação usuário-condição ambiental, a partir de uma perspectiva diferente da qual normalmente são focadas as avaliações de conforto térmico. Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos nas avaliações feitas aplicando-se a metodologia proposta, e a discussão provocada pelos dados e sua análise.

Para ambos os contextos, foi observado que, a medida que aumenta a velocidade inicial de entrada de ar, evidencia-se uma redução nas variações geradas pela ocupação do espaço. Da mesma forma, no espaço vazio, o aumento da velocidade inicial resulta na redução das variações entre condições iniciais dos casos base.

Da mesma forma, fazendo uma comparação entre contextos e entre distribuições de fachada, foi observado que a condição tridimensional do fluxo de ar, gera variações no plano de avaliação, cuja origem não pode ser explicada somente com a análise desse plano (ver figura 21). Isto foi observado, principalmente, para as distribuições em fachada com aberturas de tamanhos diferentes, onde o fluxo tem uma interação diferente com os obstáculos, daquela apresentada quando as janelas são do mesmo tamanho. Percebeu-se que esta condição gera diferenças consideráveis nas variações entre o espaço vazio e ocupado, dependendo do contexto no qual estão localizados, pois um deles possui uma abertura em fachada maior que o outro. Esta condição produz relações diferentes com o espaço e os agrupamentos, como foi observado na zona de

recirculação do ar originada pela mudança de direção do fluxo, para o Caso 2.

Observaram-se variações similares para os agrupamentos em Fileiras e Grupos. Percebe-se que isto está relacionado à sua estrutura espacial, pois ambos apresentam um esquema de obstáculos regulares, separados por corredores, que permitem o percurso livre do vento. Da mesma forma, observa-se um comportamento consideravelmente diferente entre estes e o agrupamento em Mesa Redonda, que possui uma estrutura significativamente diferente, com um obstáculo perimetral à passagem do vento, e uma zona no meio do agrupamento, de livre percurso para este.

Se fosse considerada uma sala de aula com uma distribuição da área do plano de estudo em percentagens similares para, por exemplo, 3 das faixas de velocidade, obter-se-ia um plano com 3 características ambientais diferentes no mesmo espaço. Poder-se-ia dizer que este plano tem uma condição heterogênea. Na teoria, se for desconsiderada a distribuição espacial das velocidades, e só consideradas as percentagens de cada faixa de velocidade, poderia concluir-se que, $1/3$ dos usuários não percebem movimentação do ar. Por outro lado, os $2/3$ restantes, percebem-na, com aproximadamente a metade deles obtendo alguma melhoria na sua sensação térmica.

Se pelo contrário, uma das faixas, seja aquela com maior ou com menor movimentação do ar, fora predominante, ou seja, que mais de 60 ou 70% do plano estivera classificado em uma mesma faixa, e o resto, nas demais, poder-se-ia dizer que este possui uma relativa homogeneidade. Dessa forma, a maioria dos seus usuários experimentam condições térmicas parecidas, embora sua conformidade ou inconformidade com estas, depende de cada indivíduo.

Considerando estas definições de heterogeneidade e homogeneidade do plano, e observando-se a totalidade das avaliações feitas, constatou-se que, para os casos com uma proporção 50-50 de abertura em fachadas e a menor velocidade de ingresso de ar, os planos de estudo, vazios ou ocupados, apresentavam a primeira característica descrita no parágrafo anterior. Nas avaliações posteriores, com velocidades de entrada de ar maiores, percebeu-se que estes planos adquiriram condições similares com a homogeneidade relativa.

No entanto, os casos com uma abertura de entrada menor que a de saída, evidenciam o caso contrário, apresentando maior homogeneidade para a velocidade de entrada 0.5m/s. Com a ocupação do espaço e o aumento de velocidade, a predominância, que para este caso possuía a faixa de velocidades 1, reduz-se significativamente, percebendo-se maior heterogeneidade nas velocidades do plano quando o espaço está ocupado, e quando a velocidade de entrada do ar aumenta.

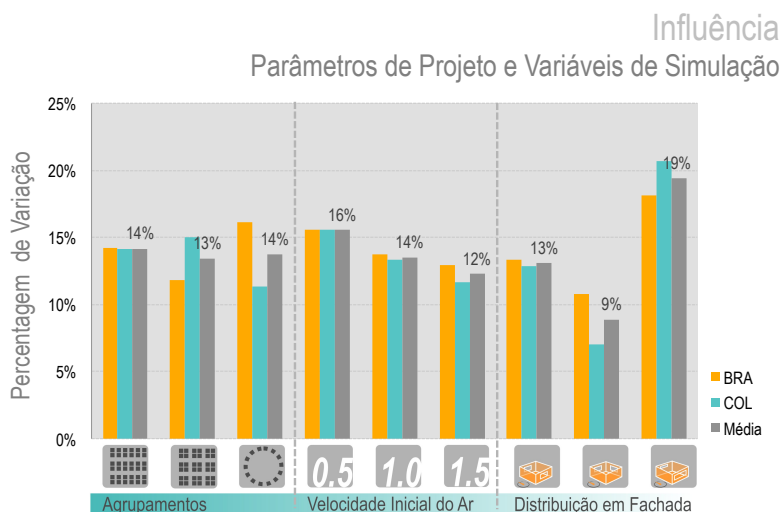


Figura 31. Valores médios das variações entre o caso base e o espaço ocupado, para todas as variáveis de Simulação e Parâmetros de Projeto

Conforme a figura 31, quando são comparados os valores médios de cada parâmetro de projeto e as variáveis de simulação apresentadas em cada contexto, observa-se que são obtidos valores similares. Para ambos os contextos, à medida que aumenta a velocidade de ingresso do ar, percebe-se uma redução na diferença entre a distribuição do plano no caso base e com ele ocupado. Da mesma maneira, para ambos, a distribuição em fachada 50-50 A apresenta a menor variação média entre o caso base e o espaço ocupado, e o Caso 3, a maior diferença. O agrupamento em Fileiras apresentou a variação média para ambos os contextos. Grupos evidenciou a menor diferença para o contexto brasileiro, e Mesa Redonda a

maior; diferentemente do contexto colombiano, onde se obteve um resultado inverso. No entanto, a diferença entre a variação máxima e mínima não ultrapassa 5%, fato que o faz pouco representativo. No total, ambos os contextos apresentaram uma variação média de cerca de 14% entre a distribuição da área do plano estudado, no espaço vazio e ocupado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo contém as conclusões finais obtidas ao finalizar este trabalho de pesquisa. Da mesma forma, enuncia as limitações do trabalho, e abre a possibilidade da formulação de outros projetos de pesquisa, a partir destas conclusões e das dúvidas originadas com este exercício.

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Sobre a metodologia de estudo

* O uso de casos hipotéticos, como modelos de avaliação, permitiu testar os parâmetros de projeto aconselhados pela normativa local de cada contexto, segundo os interesses do estudo, sem as restrições iniciais que implica o trabalho com um espaço existente. Da mesma forma, permite um maior controle das variáveis de simulação, que, se não fossem iguais para todos os casos, dificultaria a comparação e análise de resultados. No entanto, pode acontecer que as conclusões encontradas no estudo não sejam aplicáveis para alguns casos, onde as condições definidas pelo pesquisador não correspondam às do lugar estudado, por exemplo, velocidades altas de ingresso do ar. Da mesma maneira, o estudo de casos reais permite realizar testes de apoio que ajudam no entendimento das condições reais do espaço, que não podem ser considerados em casos hipotéticos.

* O estudo de um plano de avaliação localizado a 0.6m permite obter uma noção geral da condição do movimento do ar em uma altura que possui grande influência na sensação térmica das pessoas. No entanto, algumas das variações observadas neste plano têm origens na interação corpo – fluxo, em várias alturas. Dessa forma, para se obter uma explicação satisfatória, seria necessária uma análise tridimensional desta relação.

* A metodologia de avaliação proposta por este estudo pode ser aplicada à avaliação de grande quantidade de lugares, de climas e parâmetros de projeto, fazendo as adaptações

necessárias, de acordo com o exigido pelas Normativas do local de estudo e as características do seu clima.

5.1.2 Sobre os resultados deste estudo

* Considerando as percentagens totais da área do plano que mudam de uma faixa à outra, com relação aos valores obtidos no espaço vazio, evidencia-se que, efetivamente, a ocupação de um espaço possui uma grande influência no fenômeno da ventilação. Esta influência é ainda mais perceptível em espaços, como as salas de aula, que atendem, simultaneamente, uma grande quantidade de usuários.

* A imersão dos usuários dentro do fluxo do ar dentro de um espaço, não necessariamente significa uma redução nos valores de velocidade apresentados, inicialmente, pelo plano estudado. Essencialmente, a presença dos usuários no espaço aumenta a heterogeneidade da condição inicial dos valores de velocidade.

* Para casos com distribuições da área de abertura em duas janelas iguais, observa-se maior homogeneidade nas condições de velocidade do plano de estudo, quando a velocidade de entrada inicial do vento é aumentada. Em contraposição, o caso com uma distribuição 20-80 da sua área de abertura, apresenta maior heterogeneidade neste plano, com esse aumento da velocidade inicial, fato que depende, igualmente, da altura das aberturas, uma em relação à outra.

* As relativas condições de homogeneidade observadas em algumas avaliações, são resultantes de uma predominância de uma das faixas de velocidade na área do plano, produzida pelo aumento da velocidade para alguns casos (50-50) e pela proporção das aberturas. A distribuição em fachada (20-80) é impactada, em maior ou menor grau, pela ocupação do espaço, com variações observadas pela interação do fluxo com cada tipo de agrupamento.

* Agrupamentos com estruturas dos obstáculos similares, como Fileiras e Grupos, apresentam, na maioria dos casos, comportamentos semelhantes na distribuição da área do plano nas faixas de velocidades. A partir dessa perspectiva, o agrupamento Mesa Redonda obteve, para muitos casos, as variações mais atípicas, resultando em comportamentos

contrários aos demais agrupamentos. Estes comportamentos dos valores de velocidade obtidos no plano de estudo, são igualmente governados, em grande medida, pela relação entre o agrupamento, e o fluxo produzido pela proporção das aberturas nas fachadas.

* Ambos os contextos estudados obtiveram uma variação média de 14%, quando consideradas todas as avaliações realizadas. Mais estudos e avaliações são necessários em outros tipos de modelos para determinar um coeficiente o qual possa ser aplicado no comportamento do espaço vazio, para levar em consideração a ocupação. No entanto, de acordo com os dados encontrados neste estudo para ambos os contextos estudados, uma percentagem ou faixa de segurança de 15% no cálculo da ventilação natural, nos espaços, seria uma medida razoável, quando estes são usados por grande quantidade de usuários simultaneamente.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Durante o desenvolvimento deste estudo foram encontradas algumas limitações referentes ao software usado e à adoção de certas variáveis. A seguir, são explicadas estas limitações.

* O Software Usado:

O PHOENICS possui ferramentas de avaliação que facilitam a compreensão do fenômeno avaliado e oferece uma ampla informação sobre as variáveis envolvidas na dinâmica de fluidos. No entanto, possui algumas limitações na modelagem e na simulação.

Na modelagem, o software oferece uma biblioteca de materiais que podem ser atribuídos aos elementos modelados. Porém, para incluir outro material no programa, o usuário precisa intervir nos arquivos bases do programa, fazendo uso de uma linguagem computacional. Sendo este um software complexo, a modificação dos arquivos base feita por um usuário sem grandes conhecimentos em programação, poderia incorrer na possibilidade de comprometer a integridade deste. Por esta razão, este estudo adotou uma opção alternativa, selecionando

um material com texturas parecidas à requerida e modificando suas características térmicas.

Quanto à simulação, as características do programa usado, que respondem a um Código CFD, precisam de grande tempo de simulação e de potência computacional. Desta forma, alguns elementos, como a malha, foram simplificados para obter um tempo razoável de simulação.

Da mesma forma, a modelagem da radiação solar, para ser considerada no fluxo de calor da envoltória, aumenta em grande medida a complexidade da solução do modelo, incrementando, assim, a necessidade de potência computacional e tempo de simulação. Por esta razão, os pesquisadores viram-se na necessidade de calcular este fluxo de calor e adicioná-lo aos elementos do modelo.

* Variáveis do Modelo:

Para que os resultados dos diferentes casos e contextos pudessem ser comparados durante a análise, foram adotadas variáveis hipotéticas para a simulação destes. A velocidade inicial do vento foi uma destas.

Foram escolhidos 3 valores, uma velocidade baixa de 0.5m/s, uma intermediária de 1.0m/s e uma relativamente alta de 1.5m/s. As duas iniciais podem ser comuns nos contextos avaliados; no entanto, a máxima avaliada, embora ilustrativa, para se ter uma noção do seu impacto na distribuição das velocidades do plano de estudo, pode resultar incomum para as características climáticas das cidades avaliadas, especialmente, no cenário da cidade de Medellín, que possui um regime de ventos com velocidades baixas.

O PHOENICS permite a criação de vários tipos de malhas para a análise de resultados. Geralmente, para este tipo de estudo, uma malha fina, delimitada por zonas segundo os elementos modelados, é a mais comum. No entanto, com o intuito de não se obterem quantidades de células diferentes para cada avaliação, e um incremento considerável no tempo de simulação, este estudo usou uma malha regular de 0.1 por 0.1 m, em todas as direções.

* Temperatura Exterior

Este estudo é ciente de que as temperaturas oferecidas nas informações climáticas são procedentes de estações meteorológicas, equipamentos que se encontram localizados em zonas afastadas dos centros urbanos das cidades. Estes centros urbanos são cenários que geralmente apresentam temperaturas mais elevadas, devido a fenómenos como o *efeito Ilha de Calor*. Da mesma maneira, é neles onde estão localizados a maioria dos centros de ensino. No entanto, devido à falta de um coeficiente ou valor específico validado, que defina esta mudança na temperatura em cada um dos contextos, neste estudo foram considerados os dados oferecidos pelas figuras 9 e 11.

* Plano de Avaliação

A avaliação da distribuição do vento em um plano localizado a 0.6m de altura, permitiu a obtenção de uma noção geral da condição de movimentação do ar, para uma altura de grande influência no conforto das pessoas. No entanto, o fluxo do ar é um fenómeno ambiental que tem uma interação tridimensional com os objetos, apresentando valores diferentes de acordo com a altura. Da mesma forma, o comportamento de um plano influencia os outros, gerando resultados e tendências que precisam de uma análise tridimensional para entender seu comportamento.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações apresentadas no item anterior, e nos resultados e conclusões do trabalho, foram identificados alguns focos e temas complementares que poderiam dar orientações para trabalhos futuros.

- * Aplicar a metodologia proposta para uma avaliação do volume total do espaço, analisando a influência da ocupação e das formas de agrupamento na movimentação do ar, em todas as alturas. As simulações e modelagens realizadas para este estudo foram de carácter tridimensional; no entanto, a análise foi feita para um plano, a uma altura específica.

- * Analisar, junto à ventilação, outras variáveis do espaço, como a temperatura, com o intuito de aplicar modelos de conforto ao espaço e avaliar se todos os usuários estão em condições de conforto térmico similares, de acordo com as formas de agrupamento.

- * Estudar a relação e influência das proporções das aberturas de entrada e saída com as formas de agrupamento, e como estas interagem com o fluxo de ar do espaço.

- * Constatar os resultados obtidos nas simulações, aplicando a metodologia proposta ao modelo computacional de um espaço real, usando dados climáticos específicos do local, e fazendo medições físicas em salas reais, para encontrar as variações produzidas por uma ocupação fixa e uma em movimento.

- * Aplicar a Metodologia proposta para diferentes direções de incidência de vento, com o intuito de observar a interação entre os agrupamentos dos usuários e este parâmetro, e sua influência na distribuição das velocidades no espaço.

6 BIBLIOGRAFIA E REFERENCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 15220 Desempenho térmico de edificaçõesBrasil, 2003.

AHMED, A. M.; AHMAD, M.; RAHIM, A. Effect of Size of Heated Obstruction within Room on Three Dimensional Air Flow Characteristics. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 372–379, 2010.

AHMED, A. M.; AHMAD, M.; RAHIM, A. Investigation of three dimensional air flow characteristic and effect of heated obstruction within room. In: **Heat and Mass Transfer**. [s.l: s.n.]. v. 47p. 1147–1157.

ALLARD, F. (ED.). **Natural Ventilation in Buildings. A design Handbook**. London, UK: James and James, 1998. p. 356

ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. Thermal Comfort. In: **ASHRAE HandBook**. [s.l: s.n.]. p. 8.1–8.29.

ASHRAE AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE STANDARD 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, 2010.

ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**AtlantaASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., , 2007.

AZEVEDO, G. A. N. **Arquitetura Escolar e Educação: Um Modelo Conceitual de Abordagem Interacionista**. [s.l.] Universiade Federal de Rio de Janeiro, 2002.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação Natural Em Edificações**. Rio de Janeiro - RJ: PROCEL EDIFICA - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2010. p. 101

BODE, F. I. et al. **THERMAL COMFORT AND IEQ ASSESSMENT OF AN UNDER-FLOOR AIR DISTRIBUTION SYSTEM** Building Simulation. **Anais...**Chambery, France: 2013

CÂNDIDO, C. et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222–229, jan. 2010.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 379–385, fev. 2011.

CAO, X. et al. Particle Image Velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications. **Energy and Buildings**, nov. 2013.

CASTRO GALLEG0, V. et al. **Evaluation of the Relationship between Natural Ventilation and the Grouping of Five Year Old Children in a Kindergarten Classroom of Medellin** PLEA 2012. **Anais...**Lima, Perú: 2012Disponível em: <<http://www.plea2012.pe/pdfs/T02-20120130-0090.pdf>>

CASTRO GALLEG0, V. et al. **Evaluación cualitativa de la ventilación natural en función de la agrupación y las posturas de niños de cinco años y el vano de ingreso de aire en un aula de un jardín infantil de Medellín**. ENCAC 2013. **Anais...**Brasília, Brasil: 2013

CHAM. **What is PHOENICS?** Disponível em: <<http://www.cham.co.uk/>>.

CHAM. **Encyclopaedia**. Disponível em: <http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/encindex.htm>.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 848–858, abr. 2008.

CHEN, Q. et al. Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 295–303, fev. 2009.

CONCEIÇÃO, E. Z. E. et al. Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces. **Building and Environment**, v. 50, p. 190–201, abr. 2012.

CONGRESO DE COLOMBIA. **Ley 115 de 1994. Por la cual se expide la ley general de educación.** ColombiaDiario Oficial No. 41.214, de 8 de febrero de 1994, , 1994. Disponível em: <http://www.unal.edu.co/secretaria/normas/ex/L0115_94.pdf>

CONGRESSO NACIONAL. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**Brasil, 1996.

COOK, J. L.; COOK, G. **Child Development. Principles and Perspectives**. Ed. 2 ed. Boston - MA: [s.n.]. p. Capítulo 5, 1–37

CROITORU, C. V. et al. **INNOVATIVE VENTILATED ENVELOPE ELEMENTS FOR SOLAR HEAT RECOVERY IN LOW ENERGY BUILDINGS.pdf**Building and Environment. **Anais...**Chambery, France: 2013

DEPARTMENT FOR EDUCATION. **Building Bulletin 101 Ventilation of School Buildings**United Kindom, 2006.

DICIONÁRIO DO AURÉLIO. **Dicionário do Aurélio Online**. Disponível em: <<http://www.dicionariodoaurelio.com/>>. Acesso em: 17 set. 2013.

ENERGY DESIGN TOOLS - UCLA. **Climate Consultant 5.4**Los Angeles, 2012. Disponível em: <<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>>

EPA. IAQ & Student Performance. **EPA United States Enviromental Protection Agency - Indoor Environmental Division Office os Radiation and Indoor Air, 402-K-03-006**,, p. 1–8, 2003.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: Analysis and applications in Environmental Engineering**. New York: McGraw-Hill Medical, 1970. p. 244

FANGER, P. O.; TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 533–536, jul. 2002.

GARCÍA, J. R.; FUENTES, V. Viento y Arquitectura. El viento como factor de diseño Arquitectónico. In: México: Editorial Trillas, 1995.

GONZÁLEZ C, E. M. **Comportamiento Térmico de Edificaciones. Tabla: Cálculo de la Temperatura Media Interior en Región Caliente** Maracaibo, 2013.

GRIEFAHN, B.; KÜNEMUND, C. The effects of gender, age, and fatigue on susceptibility to draft discomfort. **Journal of Thermal Biology**, v. 26, n. 4-5, p. 395–400, set. 2001.

GUIMARÃES-MERÇON, M. **Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo. Análisis térmico de la cubierta ventilada**. [s.l.] Universidad Politècnica de Catalunya, 2008.

HALAWA, E.; VAN HOOFF, J. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. **Energy and Buildings**, v. 51, p. 101–110, ago. 2012.

HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J. **EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI / ASHRAE Standard 140-2011**. Washington: [s.n.]. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf>.

HUANG, C.-H.; LIN, P.-Y. Influence of spatial layout on airflow field and particle distribution on the workspace of a factory. **Building and Environment**, out. 2013.

HUMPHREYS, M. A. A study of the thermal comfort of primary school children in summer. **Building and Environment**, v. 12, n. 4, p. 231–239, jan. 1977.

IDEAM. **Atlas Climatológico de Colombia**. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia, 2005. p. 220

IDEAM, I. D. H. M. Y. E. A. **Información Aeronáutica. Régimen anual de viento: Medellín**.

ISO. **International Standard ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**. Genève, Switzerland, 1998.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Analysis SOL-AR** Florianópolis-SC, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Disponível em: <<http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>.

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - UFRGS. **Radiasol** Porto Alegre - RS, 2001.

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - UFRGS. **Radiasol 2** Porto Alegre - RS, 2011. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>

LAMBERTS, R. et al. **CONFORTO E STRESS TÉRMICO**. Florianópolis - SC, Brasil: [s.n.].

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiencia Energética na Arquitetura**. 2da Edição ed. São Paulo, Brasil: PRO Livros, 2004. p. 188

LIMB, M. **Air Infiltration and Ventilation Glossary**. Coventry - Great Britain: [s.n.]. v. 36p. 47

LOMBARDI, G. G. **Heat Transfer and the Human Body**. Disponível em: <<http://www.drphysics.com/convection/convection.html>>.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO; FUNDESCOLA, F. DE F. DA E.-. **Espaços Educativos Ensino Fundamental. Subsídios para elaboração de projetos e adequação de edificações escolares. Cadernos Técnicos 4, volume 1.** Brasília, Brasil: [s.n.].

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO; FUNDESCOLA, F. DE F. DA E.-. **Espaços Educativos Ensino Fundamental. Subsídios para elaboração de projetos e adequação de edificações escolares. Cadernos Técnicos 4, volume 2.** Brasília, Brasil: [s.n.].

MINISTÉRIO DE EDUCACIÓN NACIONAL. **Norma Técnica Colombiana NTC 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares**Colômbia, 1999.

MORALES, C.; ORDENES, M. **DISPONIBILIDADE DA VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE AULA : SEU IMPACTO NA TEMPERATURA DO ESPAÇO INTERIOR** .ELECS 2013. **Anais...**Curitiba, Brasil: 2013

MORS, S. TER et al. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts. **Building and Environment**, v. 46, n. 12, p. 2454–2461, dez. 2011.

PIETRZYK, K. **Probabilistic modelling of air infiltration and heat loss in low-rise buildings**. [s.l.] CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2000.

RAY, S. D. et al. Experimental Characterization of Full-Scale Naturally Ventilated Atrium and Validation of CFD Simulations. **Energy and Buildings**, nov. 2013.

TELI, D.; JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B. Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. **Energy and Buildings**, v. 53, p. 166–182, out. 2012.

THERMOWORKS INC. **Emissivity Table**. Disponível em: <http://www.thermoworks.com/emissivity_table.html>.

TOFTUM, J. Air movement--good or bad? **Indoor air**, v. 14 Suppl 7, n. Suppl 7, p. 40–45, jan. 2004.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Simulation Software**. Disponível em:
<<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>.

VAN HOOFF, T. et al. PIV measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: Ventilation by a free plane jet with Coanda effect. **Building and Environment**, v. 56, p. 301–313, out. 2012.

VIÑAO, A. Escolarización, Edificios y Espacios escolares. **CEE Participación Educativa**, v. 7, p. 16–27, 2008.

WANG, Y. et al. **INDOOR ENVIRONMENT OF A CLASSROOM IN A PASSIVE SCHOOL BUILDING WITH DISPLACEMENT VENTILATION** Building Simulation. **Anais...**Chambery, France: 2013

YIK, F. W. H.; LUN, Y. F. Energy Saving by Utilizing Natural Ventilation in Public Housing in Hong Kong. **Indoor and Built Environment**, v. 19, n. 1, p. 73–87, 15 mar. 2010.

Calculo da
TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR
em REGIÃO QUENTE

Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.

Referências:

Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Edisud.
France.

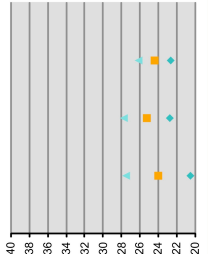
France.

BRASIL

Resistência sup. externa "Rse" (1/hse)	17	0.06
20		

50%-50%

Paredes Opostas



em REGIÃO QUENTE

TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR

Cálculo da



Desenvolvido por:

Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.
Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia

Referências:
Pierre Lavigne et al (1994)
Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Eclad, France.



BRASIL

Equação de balance térmico	$Q_{sp} + Q_{so} + Q_i = Q_c + Q_{ev} + Q_{ra} + Q_{ri}$				
Fluxo de calor por condução	Qc	$Q_c = UA(T_{im} - T_{em})$			179 W
Fluxo de calor por convecção	Qv	$Q_v = Aq(T_{im} - T_{em})$			24 W
Ganho solar direto	Qsv	$Q_{sv} = \sum f_{s,win} \cdot I_{s,win} \cdot (E_{in}/24)$			0 W
Ganho solar indireto	Qso	$Q_{so} = \sum f_{s,win} \cdot a_{win} \cdot (K\alpha\eta_e)(E_{in}/24)$			75 W
Transmitância térmica total	Ut	$U_t = (U_p S_p) + (U_v S_v) + (U_{tr})$			454 W°C
Potencia por ventilação (A * q)	A.q	$0.34 \cdot q$			61 W
Ganhos internos	Qi	$Q_i = lamp + pers + elect$			128 W
Perdas por evaporação	Qe	$Q_e = 666.66 ev \cdot f_{ev}$			0 W
Perdas por radiação de onda longa	Qrl	$Q_{rl} = \epsilon \sigma s (T_{ri}^4 - T_e^4)$			0 W
Temperatura média interior	Tim	$T_{im} = T_{em} - \Delta T_{im}$			24.4 °C
Diferença média de temperatura	ΔTim	$\Delta T_{im} = Q_{so} + Q_{sv} + Q_{ri} - Q_c - Q_v / U_t A q$			0.4 W

Caso 2

50%-50%

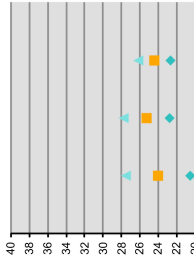
Paredes Adjacentes



Temperatura média exterior (T _{em}) em °C	24	Temperatura de conforto				25.2
Oscilação da temperatura exterior	7					
Dimensões edifício	Cumprimento	Laigura	Altura	Área	Volume	
	8	7.5	3	60	180	
Superfície Cobertura e Fachadas	Cobertura	Fac. Sul	Fac. Norte	Fac. Leste	Fac. Oeste	
	60	24	24	22.5	22.5	
Área das Janelas	0	0	7.5	7.5	0	
Área de superfícies opacas	60	24	16.5	15	22.5	
Transmitância Coberturas e Paredes "U"	3.73	1.85	1.85	1.85	1.85	
Absorvidade superfícies opacas	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	
Radiação solar em superfícies W/m ²	0	0	2040	3260	0	

Temperatura (°C)

Potência de iluminação	Nº lâmpadas	Potência	Total	
	12	32	384	
Pessoas em atividade	Nº pessoas	Atividade	Total	
	0	0	0	
Potência interna (noma)			51.2	
Trocas de ar por hora			1	
Taxa de fluxo de ar (m³/h)			180	
Transmitância de Janela "U"			5.7	
Fator ganho solar na Janela "Fv"	0	Protetor solar da Janela		
Transmitividade do vidro em Janela			0.88	
Condutância linear U _i em W/mK			0	
Resistência sup. externa "R _{se} " (hse)	17		0.06	



em REGIÃO QUENTE TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR Cálculo da



Desenvolvido por:

Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.

Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia

Referências:

Pierre Lavigne et al (1994)

Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Edisud, France.



BRASIL

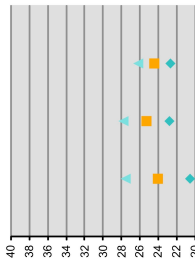
Equação de balance térmico	$Q_{sp} + Q_{so} + Q_i = Q_c + Q_{ev} + Q_{ext} + Q_{ri}$				
Fluxo de calor por condução	Qc	$Q_c = UA(T_{im} - T_{em})$			175 W
Fluxo de calor por convecção	Qv	$Q_v = Aq(T_{im} - T_{em})$			24 W
Ganho solar direto	Qsv	$Q_{sv} = \sum f_{s,win} \cdot I_{s,win} \cdot (E_{in}/24)$			0 W
Ganho solar indireto	Qso	$Q_{so} = \sum f_{s,win} \cdot a_{win} \cdot (K\alpha\eta_e)(E_{in}/24)$			71 W
Transmissão térmica total	Ut	$U_t = (U_p \cdot S_p) + (U_v \cdot S_v) + (U_{fr})$			454 W°C
Potencia por ventilação (A * q)	A.q	$0.34 \cdot q$			61 W
Ganhos internos	Qi	$Q_i = lamp + pers + elect$			128 W
Perdas por evaporação	Qe	$Q_e = 666.66 \cdot ev \cdot f_{ev}$			0
Perdas por radiação de onda longa	Qrl	$Q_{rl} = \sigma \cdot \epsilon \cdot s \cdot (T_{ri}^4 - T_{e}^4)$			0
Temperatura média interior	Tim	$T_{im} = T_{em} - \Delta T_{im}$			24.4 °C
Diferença média de temperatura	ΔTim	$\Delta T_{im} = Q_{so} + Q_{sv} + Q_{ci} - Q_c - Q_{ri} / U_p \cdot A_q$			0.4 W

Caso 3 20%-80% Paredes Opostas



Potência de iluminação				Temperatura (°C)	
Nº lâmpadas	Potência	Total			
12	32	384			
Pessoas em atividade					
Nº pessoas	Atividade	Total			
0	0	0			
Potência interna (noma)					
		51.2			
Trocas de ar por hora					
		1			
Taxa de fluxo de ar (m3/h)					
		180			
Transmissão da Janela "U"					
	5.7				
Fator ganho solar na Janela "Fv"					
0	Protetor solar da Janela				
Transmisvidade do vidro em Janela					
	0.88				
Condutância linear U _i em W/mK					
	0				
Resistência sup. externa "R _{se} " (1/mse)					
17		0.06			

Temperatura (°C)



▲ Máxima
■ Média
◆ Mínima

em REGIÃO QUENTE

TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR

Calculo da



Desenvolvido por:

Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.

Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia

Referências:

Pierre Lavigne et al (1994)

Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Etsud. France.

4COLOMBIA

Equação de balance térmico	$Q_{sp} + Q_{sg} + Q_i = Q_c + Q_{ra} + Q_{se} + Q_d$				
Fluxo de calor por condução	Q_c	$Q_c = UA(T_{im} - T_{em})$			195
Fluxo de calor por convecção	Q_v	$Q_v = Aq(T_{im} - T_{em})$			27
Ganho solar direto	Q_{sv}	$Q_{sv} = \sum f_{s,im} \cdot I_{s,im} (E_{in}/24)$			0
Ganho solar indireto	Q_{so}	$Q_{so} = \sum f_{s,im} \cdot a_{so} (K_{ohe})(E_{in}/24)$			94
Transmissão térmica total	U_t	$U_t = (U_p \cdot S_p) + (U_v \cdot S_v) + (U_{tr})$			442
Potencia por ventilação ($A \cdot q$)	$A \cdot q$	$0.34 \cdot q$			61
Ganhos internos	Q_i	$Q_i = lamp + pers + elect$			128
Perdas por evaporação	Q_e	$Q_e = 666.66 ev \cdot f_{ev}$			0
Perdas por radiação de onda longa	Q_{rl}	$Q_{rl} = ar \cdot s (T_{rl}^4 - T_c^4)$			0
Temperatura média interior	T_{im}	$T_{im} = T_{em} - D/Tm$			23.4
Diferença média de temperatura	D/Tm	$D/Tm = Q_{sv} + Q_{so} + Q_i - Q_c - Q_v / U_t A \cdot q$			0.4

Caso 1

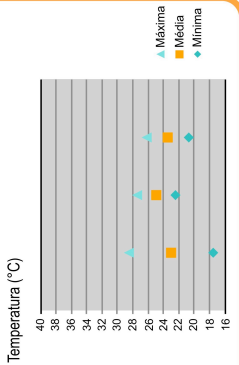
50%-50%

Paredes Opostas



Temperatura média exterior (T_{em}) em °C	23	Temperatura de conforto				24.9
Oscilação da temperatura exterior	11					
Dimensões edifício		Cumprimento	Largura	Altura	Área	Volume
		8	7.5	3	60	180
Superfície Cobertura e Fachadas		Cobertura	Fac. Sul	Fac. Norte	Fac. Leste	Fac. Oeste
		60	24	24	22.5	22.5
Área das Janelas	0	6	6	0	0	0
Área de superfícies opacas	60	18	18	22.5	22.5	
Transmissão Coberturas e Paredes "U"	3.73	1.85	1.85	1.85	1.85	
Absorvidade superfícies opacas	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	
Radiação solar em superfícies W/m ²	0	3344	2404	0	0	

Potência de iluminação	Nº lâmpadas	Potência	Total	
	12	32	384	
Pessoas em atividade	Nº pessoas	Atividade	Total	
	0	0	0	
Potência interna (noma)			51.2	
Trocas de ar por hora			1	
Taxa de fluxo de ar (m ³ /h)			180	
Transmissão de Janela "U"			5.7	
Fator ganho solar na Janela "Fv"	0	Protetor solar da Janela		
Transmissividade do vidro em Janela			0.88	
Condutância linear U _i em W/mK			0	
Resistência sup. externa "Rse" (hse)	17		0.06	



▲ Máxima
■ Média
◆ Mínima

em REGIÃO QUENTE

TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR

Cálculo da



Desenvolvido por:

Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.
Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia

Referências:
Pierre Lavigne et al.(1994)
Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Etsud. France.

Equação de balance térmico	$Q_{sp} + Q_{sg} + Q_i = Q_c + Q_{ev} + Q_{ra} + Q_{di}$				
Fluxo de calor por condução	Qc	$Q_c = UA(Tim - Tem)$			190
Fluxo de calor por convecção	Qv	$Q_v = Aq(Tim - Tem)$			28
Ganho solar direto	Qsv	$Q_{sv} = \sum f_{vi} \cdot S_{vi} \cdot I_{vi} (E_{vi}/24)$			0
Ganho solar indireto	Qso	$Q_{so} = \sum f_{vi} \cdot S_{vi} \cdot a_{vi} (Kt/ht)(E_{vi}/24)$			89
Transmitância térmica total	Ut	$U_t = (U_p \cdot S_p) + (U_v \cdot S_v) + (U_{tr})$			442
Potencia por ventilação (A * q)	A.q	$0.34 \cdot q$			61
Ganhos internos	Qi	$Q_i = lamp + pers + elect$			128
Perdas por evaporação	Qe	$Q_e = 666.66 \cdot ev \cdot f_{ev}$			0
Perdas por radiação de onda longa	Qrl	$Q_{rl} = ar \cdot s(Tl^4 - Te^4)$			0
Temperatura média interior	Tim	$Tim = Tem - DTim$			23.4
Diferença média de temperatura	DTim	$DTim = Q_{sv} + Q_{so} + Q_i - Q_c - Q_v / (U_p \cdot A_q)$			0.4

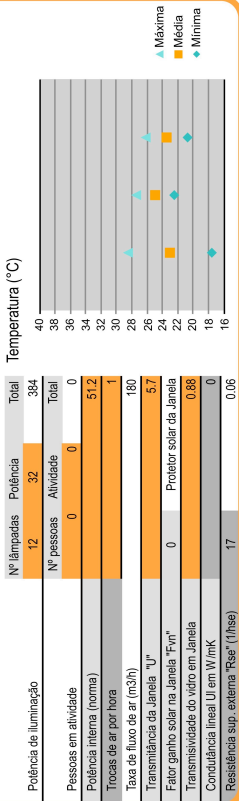
Caso 2

50%-50%

Paredes Adjacentes



Temperatura média exterior. (Tem) em °C	23	Temperatura de conforto				24.9
Oscilação da temperatura exterior	11					
Dimensões edifício	Cumprimento	Laigura	Altura	Área	Volume	
	8	7.5	3	60	180	
Superfície Cobertura e Fachadas	Cobertura	Fac. Sul	Fac. Norte	Fac. Leste	Fac. Oeste	
	60	24	24	22.5	22.5	
Área das Janelas	0	0	6	6	0	
Área de superfícies opacas	60	24	18	16.5	22.5	
Transmitância Coberturas e Paredes "U"	3.73	1.85	1.85	1.85	1.85	
Absorvidade superfícies opacas	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	
Radiação solar em superfícies W/m2	0	0	2404	3510	0	



em REGIÃO QUENTE

TEMPERATURA MÉDIA INTERIOR

Cálculo da



Desenvolvido por:
Prof. Dr. Eduardo M. Gonzalez C.
Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia

Referências:
Pierre Lavigne et al. (1994)
Architecture Climatique. Une contribution au développement durable. Etsud. France.

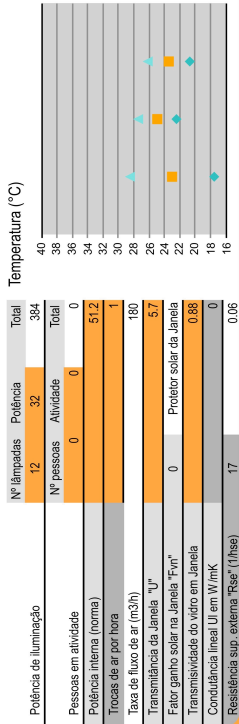
COLOMBIA

Equação de balance térmico	$Q_{sp} + Q_{sg} + Q_i = Q_c + Q_{ra} + Q_{se} + Q_d$				
Fluxo de calor por condução	Q_c	$Q_c = UA (T_{im} - T_{em})$			W
Fluxo de calor por convecção	Q_v	$Q_v = Aq (T_{im} - T_{em})$			27
Ganho solar direto	Q_{sv}	$Q_{sv} = \sum f_{s,im} \cdot I_{s,im} (E_{en}/24)$			W
Ganho solar indireto	Q_{so}	$Q_{so} = \sum f_{s,im} \cdot a_{so} (K_{ohe}) (E_{en}/24)$			91
Transmissão térmica total	U_t	$U_t = (U_p S_p) + (U_v S_v) + (U_{tr})$			W/°C
Potencia por ventilação ($A \cdot q$)	$A \cdot q$	$0.34 \cdot q$			61
Ganhos internos	Q_i	$Q_i = lamp + pers + elect$			W
Perdas por evaporação	Q_e	$Q_e = 666.66 ev \cdot f_{ev}$			0
Perdas por radiação de onda longa	Q_{rl}	$Q_{rl} = ar \cdot s (T_{rl}^4 - T_c^4)$			0
Temperatura média interior	T_{im}	$T_{im} = T_{em} - D T_{im}$			°C
Diferença média de temperatura	$D T_{im}$	$D T_{im} = Q_{sv} + Q_{so} + Q_i - Q_c - Q_v / (U_p A \cdot q)$			0.4

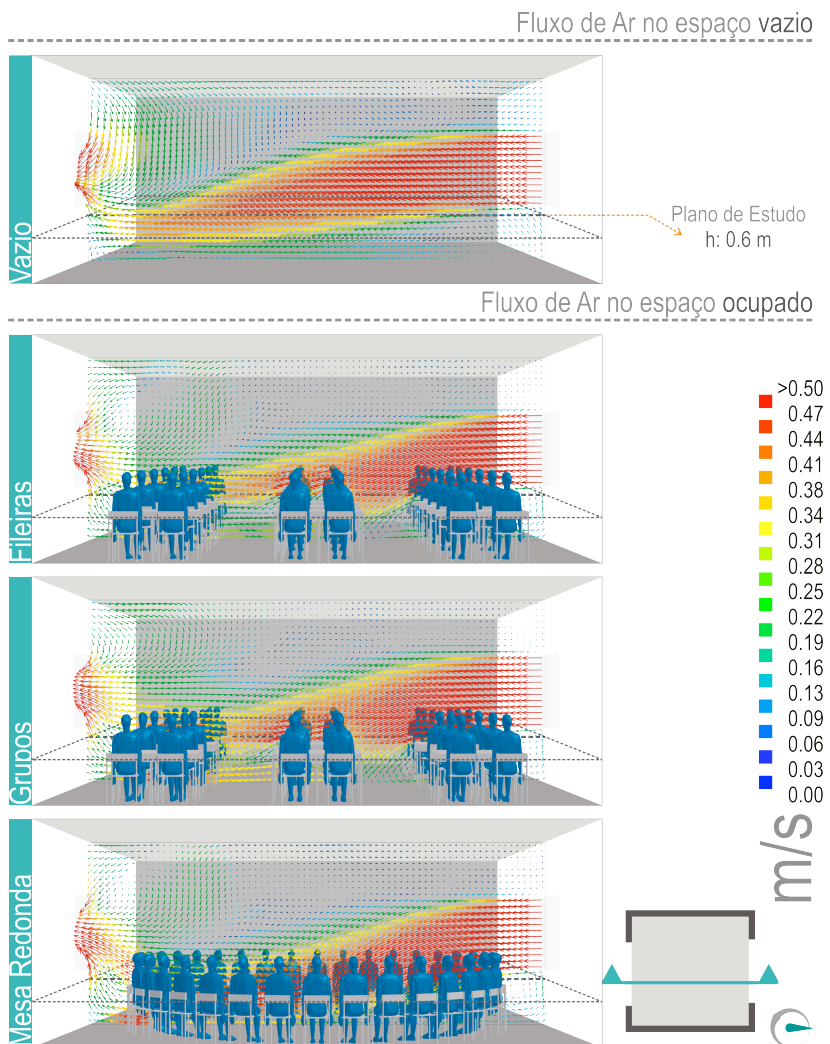
Caso 3

20%-80%

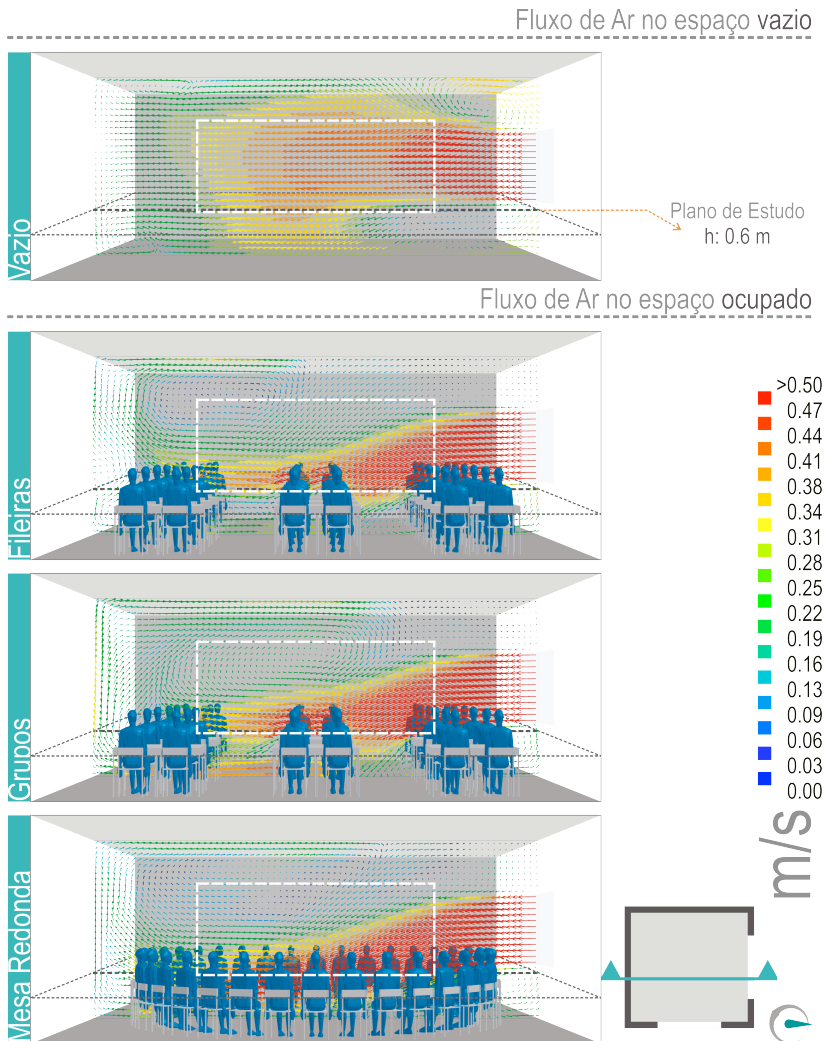
Paredes Opostas



ANEXO 2: Fluxo De Ar no Espaço Vazio e Ocupado, com uma Distribuição de Aberturas em Fachadas 50-50, para o contexto brasileiro, com uma Velocidade Inicial de 0.5m/s, considerando o Aporte de Calor do Corpo dos Usuários



A2 – Figura 1. Caso 1, distribuição em fachada 50-50 em paredes opostas.



A2 – Figura 2. Caso 2, distribuição em fachada 50-50 em paredes Adjacentes.

ANEXO 3:

APLICAÇÃO DA ASHRAE STANDARD 140 (BESTEST) COMO FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO DE CÓDIGOS CFD

RESUMO

A *ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, Standart Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, tem sido amplamente utilizada no processo de validação e avaliação de novos softwares ou novas versões de softwares de simulação energética em edificações. Mediante a modelagem e simulação de uma série de *casos base* listados na norma, que possuem diferentes características e cargas energéticas, esta permite, através de comparações, definir se os diferentes fenômenos estão sendo representados adequadamente pelo novo código e se o usuário consegue modelar corretamente a edificação em questão. No caso dos códigos CFD ou de Computational Fluid Dynamics, estes são testados e validados mediante a comparação dos resultados obtidos com dados experimentais, tomados em modelos em escala real ou em escala reduzida. No entanto, às vezes, os casos avaliados são de caráter empírico, que por razões de tempo ou orçamento, não podem ser levados a um modelo físico de pequena escala ou de escala real. Mesmo sendo modelos representativos, desde uma visão acadêmica, o pesquisador tem interesse de conferir e reafirmar se os fenômenos físicos estão sendo representados adequadamente. O objetivo deste estudo então, é avaliar, através de uma pesquisa de caráter exploratório, o potencial de aplicação da ANSI/ASHRAE Standard 140 como uma ferramenta de validação em casos simples simulados com códigos CFD. Para seu desenvolvimento, foram usados os parâmetros e dados contidos na ANSI/ASHRAE standard 140 de 2007 e os dados obtidos da modelagem e simulação dinâmica dos casos 600ff e 900ff no software EnergyPlus 8.1, para todo o ano, e a sua modelagem e simulação estática para uma hora do dia 4 de Janeiro, no

PHOENICS 2012. Durante a modelagem dos casos, se observa uma dificuldade para integrar o calor armazenado no envelope pela ação da inércia térmica, razão pela qual os valores de temperatura interna obtidos para o caso 600ff, com cada um dos softwares, foi muito similar, e para o caso 900ff os valores apresentaram uma maior diferença.

Palavras-chave: ANSI/ASHRAE standard 140, Best Test, EnergyPlus, CFD, Validação.

INTRODUÇÃO

Os modelos experimentais e as simulações numéricas são os modelos mais comuns na avaliação de campos de fluxo do ar em ambientes internos (CAO et al., 2013). O primeiro destes modelos, o experimental, requer de longos períodos de tempo para ser realizado e é de difícil execução. As simulações numéricas, contudo, são ferramentas que oferecem informações globais e detalhadas em um período de tempo relativamente curto e a um custo menor.

No entanto, sendo códigos computacionais, os modelos de simulação numérica, como os CFD, são suscetíveis a apresentar diferenças com o fenômeno real, mesmo com as condições ambientais modeladas cuidadosamente. Essas diferenças podem ser originadas pela modelagem ou pelo sistema operacional, ou seja, o equipamento computacional.

Por esta razão, é necessário considerar dois procedimentos importantes quando se for fazer uso destes, a validação e a verificação. O primeiro é o procedimento que permite conferir se a equação escolhida no modelo é a correta para o propósito do estudo; o segundo permite verificar se a equação escolhida está sendo resolvida corretamente pelo sistema.

No caso da validação, interesse principal deste estudo, um dos procedimentos comuns é o uso de testes experimentais, em um espaço real ou em um modelo em escala, para comparar com dados reais os valores obtidos por meio do modelo computacional.

A medição da velocidade no campo do fluxo do ar, também conhecida como velocimetria, pode ser de dois tipos. Em

primeiro lugar está aquela que é medida ponto a ponto, denominada *Point-wise velocimetry*. Esta técnica só pode obter o valor da velocidade no ponto no qual está localizado o sensor, e este valor é medido por meio de diferentes tipos de anemômetros ou fazendo uso de um Laser Doppler. Apesar de ser um procedimento comumente usado neste tipo de medição, inserir um instrumento de medição dentro do fluxo de ar pode gerar modificações neste.

O segundo grupo de técnicas é baseado em princípios óticos, e através destas podem-se obter a velocidade e outras variáveis estatísticas relacionadas a esta, em um domínio global, sem afetar o fluxo original do ar. Este tipo de teste é denominado *Global-wise velocimetry*, e pode ser realizado através de 3 métodos: a *Particle Tracking Velocimetry* (PTV), *Particle Streak Velocimetry* (PSV) e a *Particle Image Velocimetry* (PIV).

Esta última, a PIV ou velocimetria por meio de imagens de partículas, em português, é a técnica mais comum. Esta pode ser usada em modelos experimentais em ambas as escalas, e como complemento à visualização do fluxo, permite obter medidas quantitativas de campos instantâneos turbulentos, permitindo a determinação direta de duas dimensões fundamentais da velocidade da partícula, o deslocamento e o tempo (CAO et al., 2013).

Este modelo está composto por um sistema de Laser Multi pulsante, uma ou varias maquinas de fotografia digitais e um computador para o processamento dos dados. O laser cria uma lâmina luminosa, na qual são fotografadas as partículas. A análise dos dados consiste em capturar duas imagens das partículas inseridas no fluxo sobre esta lâmina em dois quadros diferentes, e posteriormente, realizar um análise de correlações cruzadas em vários passos, obtendo finalmente uma imagem única que representa o fluxo avaliado (CAO et al., 2013).

Van Hooff et al. (2012), observaram que os modelos de simulação numéricos estão sendo usados cada vez mais como uma ferramenta na predição dos sistemas de ventilação, mas ressaltam que para estes serem usados devem ser validados, comparando os dados com dados experimentais de alta qualidade. De acordo com os autores deste texto, os fluxos de ventilação de fluxo turbulento têm sido amplamente estudados, contando-se na atualidade, com uma boa quantidade de dados para realizar estas validações. No entanto, ainda se tem uma

falta considerável de dados experimentais para os fluxos de ventilação de transição. Dessa forma, os pesquisadores deste estudo fizeram uso desta técnica num modelo de escala reduzida, composto por uma coluna de água, uma zona de acondicionamento do fluxo, uma zona cúbica que representava em escala o espaço interior avaliado e uma zona de vazamento, para criar dados experimentais de qualidade para este tipo de fluxo.

Ray et al. (2013), aplicaram este método, usando bolhas de hélio como partículas traçadoras, para realizar um experimento a escala real em um átrio naturalmente ventilado. Os dados foram obtidos com o propósito de validar 3 modelos de turbulência de um CFD (o RGN $k-\epsilon$, $k-\epsilon$, e o Large Eddy Simulation – LES).

O modelo experimental permitiu observar uma corrente de ar cuja direção era contrária à esperada em um sistema deste tipo, fato que ressalta a importância de um apropriado dimensionamento e projeção destes sistemas. Segundo o concluído pelos pesquisadores, as bolhas de hélio usadas como traçadores demonstraram representar o fenômeno claramente, e comparando os resultados experimentais com os obtidos por meio de simulações numéricas para os três modelos de turbulência, eles concluíram que o modelo LES representava numericamente o fenômeno, com maior precisão.

Croitoru et al. (2013), por outro lado, num estudo de um envelope ventilado por meio de dois tipos de perfurações, simulado numericamente com o código CFD, FLUENT, e avaliado experimentalmente em condições de laboratório, usaram o primeiro tipo de técnica citada, para realizar a velocimetria, a *Point-wise velocimetry*. Eles usaram 3 sensores de temperatura (Termopares tipo K) para medir a temperatura de ambiente, a temperatura interior dentro do modelo e a temperatura de saída do ar, e encontraram que alguns dos seus resultados computacionais subestimaram a eficiência de uma destas perfurações, em comparação com os resultados obtidos a traves do modelo experimental. No entanto, os autores concluíram que, em geral, os resultados computacionais obtidos foram consequentes com os valores reais e desta forma seu modelo numérico foi validado.

Desta forma, é possível concluir, que independentemente do modelo ou da técnica usada para medir os dados

experimentais, é importante validar os modelos de simulação numérica fazendo uso destes, para conferir que efetivamente o que foi modelado e simulado corresponde ao fenômeno real.

No entanto, às vezes, os casos avaliados são de caráter empírico, que por razões de tempo ou orçamento, não podem ser levados a um modelo físico de pequena escala ou de escala real. Embora sendo modelos representativos, desde uma visão acadêmica, o pesquisador tem interesse de conferir e reafirmar que os fenômenos físicos estão sendo representados apropriadamente.

A ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, Método Padrão de Teste para a Avaliação dos Programas computacionais de análise energética de edificações, como seu nome enuncia “especifica procedimento de teste para avaliar as capacidades técnicas e faixas de aplicabilidade de programas computacionais que calculam o desempenho térmico de edificações” (ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE, 2007).

A diferença dos procedimentos listados acima, que usualmente implicam um modelo físico, bem seja a escala reduzida ou real, e medições, este procedimento trabalha com modelos hipotéticos e comparação de resultados com limites máximos e mínimos.

Mediante a modelagem e simulação de uma série de casos base listados na norma, que possuem diferentes características e cargas energéticas, esta permite através de comparações, definir se os diferentes fenômenos estão sendo representados adequadamente pelo novo código e se o usuário consegue modelar corretamente a edificação em questão.

Os procedimentos listados nesta norma têm sido amplamente usados no processo de validação e avaliação de novos softwares ou novas versões de softwares de simulação energética em edificações, como no caso do Energy Plus (HENNINGER; WITTE, 2013).

Desta maneira, o propósito deste estudo é avaliar, através de uma pesquisa de caráter exploratório, o potencial de aplicação da ANSI/ASHRAE Standard 140 como uma ferramenta de validação em casos simples simulados com códigos CFD, como um instrumento de uso alternativo, para esses casos onde não possam ser empregados ou produzidos dados reais para comparar com os resultados da simulação.

Para o 'seu desenvolvimento foram usados os parâmetros e dados contidos na ANSI/ASHRAE standard 140 de 2007 e os dados obtidos da modelagem e simulação dos casos 600ff e 900ff nos softwares EnergyPlus 8.1 e PHOENICS 2012.

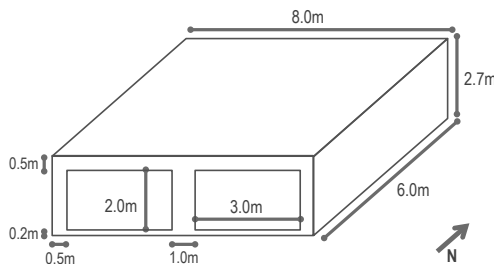
METODOLOGIA

Este exercício de pesquisa fez parte do processo de desenvolvimento de uma dissertação no tema de ventilação natural, razão pela qual foram selecionados os casos 600ff e 900ff, que dentro dos propostos pela norma ANSI/ASHRAE 140, não consideram o uso de ar condicionado e aquecimento dentro do espaço avaliado.

A Norma faz um ampla descrição dos casos definindo os diferentes componentes que podem ser usados para sua modelagem no software. A quantidade de componentes necessários para sua representação em cada software depende em grande medida dos parâmetros usados por este para reproduzir virtualmente seu comportamento térmico.

* Descrição dos Casos avaliados

Ambos os casos escolhidos, o 600ff e o 900ff, possuem a mesma geometria, com diferença apenas na composição do seu envelope. O espaço é um quarto de dimensões 6.0m de largura, 8.0m de comprimento e 2.7m de pé direito, como ilustra a figura 1.



A3-Figura 1. Dimensões do espaço (Fonte: ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE, 2007)

Os casos 600 descritos pela norma correspondem aos *Low mass basic tests*, espaços com um envelope composto por paredes, cobertura e piso-leves; e os casos 900 correspondem a os modelos *High mass basic tests*, compostos por paredes em

alvenaria e piso em laje de concreto. A abreviatura *ff*, é usada pela norma para diferenciar os casos que possuem sistemas mecânicos de acondicionamento daqueles denominados *Free flood basic tests*, casos que foram usados neste estudo.

A norma define, para todos os testes, uma refletância solar do piso exterior de 0.2, e uma infiltração de 0.5 renovações de ar por hora, durante as 24 horas do dia, todo os dias do ano. Da mesma forma, define para o espaço interior, uma carga térmica de 200W, correspondentes ao calor que pode ser gerado pelos equipamentos, pelas pessoas, pelo sistema de iluminação, entre outros. Este calor deve ser modelado como 60% radiativo e 40% convectivo, e 100% dele deve ser sensível e 0% latente.

As tabelas 1, 2, 3 e 4, apresentam as características construtivas e propriedades térmicas dos elementos que compõem o envelope, como as paredes, o piso, a cobertura e os elementos das janelas.

A3-Tabela 1. Especificações dos Materiais do Caso de Estrutura Leve
(Adaptado de ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE (2007),
Tradução da Autora)

Elemento	k [W/(mK)]	Espessura [m]	U [W/(m ² K)]	R [(m ² K)/W]	Densidade [kg/m ³]	C_p [J/(kgK)]
Casos Lightweight (Estrutura Leve): Parede Exterior (de dentro para fora)						
Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Placa de Gesso	0.160	0.012	13.333	0.075	950.000	840.000
Colcha de Fibra de Vidro	0.040	0.066	0.606	1.650	12.000	840.000
Tapume de Madeira	0.140	0.009	15.556	0.064	530.000	900.000
Coef. Sup. Externa			29.300	0.034		
Total Ar-Ar			0.514	1.944		
Total Ar-Superfície			0.559	1.789		
Casos Lightweight (Estrutura Leve): Piso (de dentro para fora)						
Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Piso de Madeira	0.140	0.025	5.600	0.179	650.000	1200.000
Isolamento	0.040	1.003	0.040	25.075	Mínimo	Mínimo
Total Ar-Ar			0.039	25.374		
Total Ar-Superfície			0.040	25.254		

Casos Lightweight (Estrutura Leve): Teto (de dentro para fora)

Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Placa de Gesso	0.160	0.010	16.000	0.063	950.000	840.000
Colcha de Fibra de Vidro	0.040	0.112	0.358	2.794	12.000	840.000
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530.000	900.000
Coef. Sup. Externa			29.300	0.034		
Total Ar-Ar			0.318	3.147		
Total Ar-Superfície			0.334	2.992		

Resumo Casos Lightweight (Estrutura Leve)

Componente	Área [m ²]	UA [W/K]				
Parede	63.600	32.715				
Piso	48.000	1.892				
Teto	48.000	15.253				
S. Janela	12.000	36.000				
Infiltração		18.440				
Total UA (com S. Vidro)		104.300				
Total UA (sem S. Vidro)		68.300				
		Renovações de Ar - h	Volume [m³]	Altitude [m]		
		0.500	129.600	1609.000		

A3-Tabela 2. Especificações dos Materiais do Caso de Estrutura Pesada
(Adaptado de ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE (2007),
Tradução da Autora)

Elemento	k [W/(mK)]	Espessura [m]	U [W/(m ² K)]	R [(m ² K)/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/(kgK)]
Casos Heavyweight (Estrutura Pesada): Parede Exterior (de dentro para fora)						
Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Bloco de Concreto	0.510	0.100	5.100	0.196	1400.000	1000.000
Isolamento de Espuma	0.040	0.062	0.651	1.537	10.000	1400.000
Tapume de Madeira	0.140	0.009	15.556	0.064	530.000	900.000
Coef. Sup. Externa			29.300	0.034		
Total Ar-Ar			0.512	1.952		
Total Ar-Superfície			0.556	1.797		
Casos Heavyweight (Estrutura Pesada): Piso (de dentro para fora)						
Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Laje de Madeira	1.130	0.080	14.125	0.071	1400.000	1000.000
Isolamento	0.040	1.007	0.040	25.175	Mínimo	Mínimo
Total Ar-Ar			0.039	25.366		
Total Ar-Superfície			0.040	25.246		

Casos Heavyweight (Estrutura Pesada): Teto (de dentro para fora)						
Coef. Sup. Interna			8.290	0.121		
Placa de Gesso	0.160	0.010	16.000	0.063	950.000	840.000
Colcha de Fibras de Vidro	0.040	0.112	0.358	2.794	12.000	840.000
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530.000	900.000
Coef. Sup. Externa			29.300	0.034		
Total Ar-Ar			0.318	3.147		
Total Ar-Superfície			0.334	2.992		
Resumo Casos Heavyweight (Estrutura Pesada)						
Componente	Área [m ²]	UA [W/K]				
Parede	63.600	32.580				
Piso	48.000	1.892				
Teto	48.000	15.253				
S. Janela	12.000	36.000				
Infiltração		18.440				
Total UA (com S. Vidro)		104.165				
Total UA (sem S. Vidro)		63.165				
			Renovações de Ar - h	Volume [m ³]	Altitude [m]	
			0.500	129.600	1609.000	

A3-Tabela 3. Especificações das propriedades das Janelas (Fonte: HENNINGER; WITTE, 2013. Tradução da Autora).

Propriedade da Janela	Valor
Coefficiente de extinção	0.0196/mm
Número de painéis	2
Espessura dos Painéis	3.175mm
Espessura da Câmara de Ar entre os Painéis	13mm
Índice de Refração	1.526
Transmitância normal direto através de um painel	0.862
Condutividade térmica de vidro	1.06 W/mK
Condutância de cada uma das vidraças	333 W/m ² K
Combinação do Coeficiente radiativo e convectivo da câmara de Ar	6.297 W/m ² K
Coeficiente superficial exterior combinado	21.00 W/m ² K
Coeficiente superficial interior combinado	8.29 W/m ² K
Valor U a partir do ar interior para o ar ambiente	3.0 W/m ² K
Emitância infravermelha hemisférica do vidro comum sem revestimento	0.9
Densidade do Vidro	2500 kg/m ³
Calor específico do vidro	750 J/kgK
Elementos de proteção solar interiores	Nenhum
Coeficiente de sombreamento do painel duplo a uma incidência normal	0.907
Coeficiente de ganho de calor solar do painel duplo na incidência normal	0.789

A3-Tabela 4. Coeficientes superficiais interiores combinados (Adaptado de ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE (2007), Tradução da Autora)

Coeficiente superficial interior combinado Vs. orientação da superfície

<i>Orientação da Superfície e do Fluxo de Calor</i>	<i>Coeficiente</i>
Transferência de Calor horizontal em superfícies Verticais	8.29 W/m ² K
Transferência de Calor ascendente em superfícies Horizontais	9.26 W/m ² K
Transferência de Calor descendente em superfícies Horizontais	6.13 W/m ² K

A simulação deve ser feita fazendo uso do arquivo climático *DRYCOLD.TMY*, que corresponde à cidade de Denver, Colorado, nos estados unidos, que possui um clima frio e seco, com condições extremas de temperatura e mudanças consideráveis nas condições térmicas no interior, que permitem testar as capacidades técnicas que o software tem para representar o fenômeno.

*** Procedimento de Avaliação**

Inicialmente, os casos 600ff e 900ff foram modelados no software EnergyPlus 8.1 (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2013), de acordo com as características descritas no item anterior. As condições térmicas dos dois espaços foram simuladas para um ano completo, segundo o indicado pela ANSI/ASHRAE 140, e como *OUTPUTS* foram solicitados a Temperatura de bulbo seco exterior (°C), a Temperatura de bulbo seco interior (°C), a Radiação solar direta por metro quadrado (W/m²), a Radiação solar difusa por metro quadrado (W/m²), o Azimute solar e Ângulo de altura solar.

Dos dados de temperatura de bulbo seco obtidos no interior do espaço durante todo o ano, foram selecionados os valores de temperatura interior máximo e mínimo apresentados pelo espaço no ano, e foi calculada a média anual das temperaturas interiores para cada caso, com o intuito de serem comparadas com a faixa de dados oferecidos pela norma, na tabela Free Float Temperature Output ((ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE, 2007. p.101).

Da mesma forma, de acordo com a tabela 39 da mesma norma, para os casos 600ff e 900ff, as 24 horas do dia 4 de Janeiro, devem ser representadas em forma de gráfico para serem comparadas com as curvas obtidas por outros softwares.

Os demais dados de Outputs foram solicitados para facilitar a modelagem de alguns elementos no código CFD, PHOENICS.

Uma vez validados os dados das simulações feitas no EnergyPlus, através da norma 140, foi dado início à Etapa 2 do exercício, passando à representação dos mesmos casos no código CFD.

As simulações neste tipo de softwares, possuem características diferentes às apresentadas por programas computacionais como EnergyPlus. A diferença deste, que permite a simulação dinâmica de diferentes condições ambientais para as 24 horas do dia, os 365 dias do ano, os códigos CFD, partindo de umas condições iniciais, rodam uma simulação hasta alcançar um estado de equilíbrio, uma convergência das variáveis.

Devido às características das simulações estáticas, alguns fatores que representam um impacto considerável no comportamento térmico das edificações, são difíceis de integrar à simulação, como é o caso do calor armazenado nos elementos construtivos devido a sua inércia térmica. Por esta razão, foi selecionada a transição das 7:00h às 8:00h, do dia 4 de janeiro para ser simulada no PHOENICS.

Para esta data, esse é o período de tempo no qual o espaço começa a ganhar calor pela radiação do sol sobre os diferentes elementos do envelope. Dessa forma, é uma hora na qual a temperatura interior não depende, em grande medida, do calor acumulado nos elementos construtivos.

Dentro do módulo FLAIR do PHOENICS foi definido um domínio equivalente ao tamanho do espaço definido pela norma (x) 8m, (y) 6m e (z) 2.7m), adicionando além disso a espessura das paredes e a cobertura. Diferentemente do EnergyPlus, dentro do PHOENICS os elementos do envelope devem ser modelados como objetos 3D. A malha de avaliação usada foi construída de forma automática pelo programa, criando zonas definidas pelas bordas dos diferentes objetos modelados dentro do domínio, e adicionando subdivisões a cada zona resultantes. Quanto à dependência do tempo, esta foi mudada de STEADY (estática) para transiente. Dessa forma o SOLVER, módulo do programa que corre a simulação, produz uma solução para cada passo no tempo, antes de avançar para o seguinte (CHAM, 2014).

Nas propriedades do domínio, foi definida a temperatura inicial do espaço em -17.31 para o caso 600ff, e em -2.93 para o caso 900ff. Valores que foram tomados dos resultados do EnergyPlus, equivalentes às temperaturas médias interiores das 7:00h para cada caso.

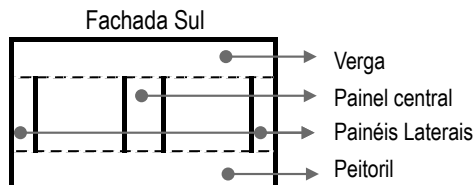
Na opção *Models* da barra de Menu foi definido, para a equação de energia, o modelo de TEMPERATURA; e como modelo de radiação, o IMMERSOL, “o método de manipulação simultânea de radiação e transferência de calor conjugado em circunstâncias complexas” (CHAM, 2014). Este Modelo responde bem às necessidades do exercício exploratório realizado neste estudo, e dentre os oferecidos pelo programa, é o mais simples de usar, pois os demais modelos disponíveis precisam de programação manual dentro do arquivo de entrada do programa (q1). Finalmente, como modelo de turbulência, foi escolhido o LVEL, utilizado na maioria dos casos do FLAIR, pois é o modelo mais indicado quando se tem muitos objetos no domínio com uma malha com as características da usada para este estudo, e para problemas que envolvem a análise conjunta de escoamento de fluidos e transferência de calor.

Sendo um exercício de caráter exploratório foi definido um número de 3000 iterações, uma quantidade apropriada para alcançar uma precisão aceitável para cada variável, com uma economia no tempo de computação razoável.

Cada um dos elementos que compõem o espaço foi modelado como OBJETOS dentro do domínio. As paredes e a cobertura foram modelados como objetos BLOCKAGE, e para cada um foi calculado o fluxo de calor total que passa ao espaço através deles, de acordo com os valores de irradiação solar das 8:00h e a diferença de temperatura entre o interior e o exterior do modelo. As características dos materiais dos elementos construtivos foram definidas segundo o estipulado pela norma 140, adicionando além do fluxo de calor calculado para cada um, segundo os dados da tabela 5, os Coeficientes superficiais interiores combinados, descritos na tabela 4.

A3-Tabela 5. Fluxo de calor que ingressa ao espaço por cada elemento opaco da envelope

Elemento	Caso 600ff				Caso 900ff			
Parede Norte	7.32				-162.09			
Parede Leste	-41.48				-171.50			
Parede Oeste	11.58				-117.01			
Cobertura	-54.22				-301.15			
Parede Sul	P. Laterais	P. Central	Verga	Peitoril	P. Laterais	P. Central	Verga	Peitoril
	-2.96	-5.04	-10.30	-4.12	-13.49	-20.10	-41.91	-16.76



A3-Figura 2. Elementos que compõem a fachada Sul

O Piso do espaço foi o único elemento modelado como um objeto PLATE, que corresponde a uma superfície bidimensional. Devido à grande camada de isolamento térmico definida na norma para este elemento, é pouco provável o intercâmbio de calor por este, por esta razão, foi simulado como uma superfície adiabática.

Os elementos translúcidos, para este casos as duas janelas de 2m de largura por 3m de comprimento, foram modelados como SunLight Objects, objetos próprios do programa que representam o feixe luminoso que atravessa pela janela e seu aporte térmico, com base na transmitância do vidro, no ângulo solar, o azimuth e a radiação horizontal global da hora avaliada; dados que foram obtidos dos resultados do EnergyPlus.

Devido ao fato de não existir um elemento específico que permita modelar dentro do software a infiltração, equivalente a 0.5 renovações por hora definidas pela norma, esta foi modelada como uma Entrada (INLET) de 0.1m de altura e 3m de comprimento. Para este elemento foi definida uma taxa de fluxo volumétrico de $14\text{m}^3/\text{s}$, que para o volume do espaço avaliado, equivale a quantidade de infiltração especificada, a uma temperatura inicial de -23.62°C , temperatura exterior das 8:00h do dia 4 de Janeiro. A INLET foi localizada na parte superior de

uma das janelas, sem diminuir os elementos opacos da parede sul e sem interferir com o ganho de calor por radiação da janela.

Um objeto BLOCKAGE em forma de paralelepípedo foi adicionado com uma carga térmica de 200W, em cumprimento ao estipulado pela norma.

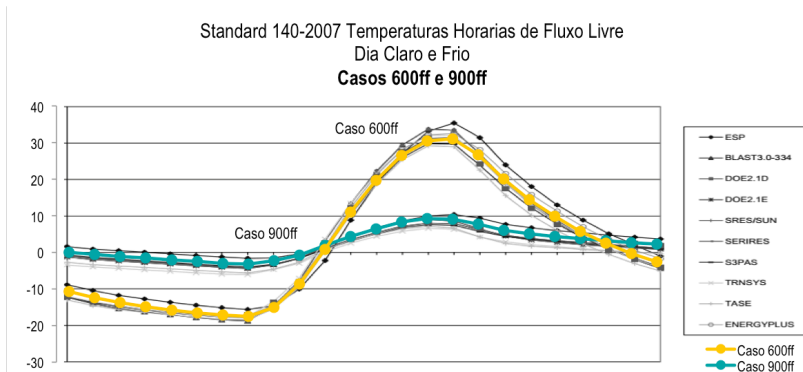
O propósito deste exercício foi obter, adotando-se os valores da temperatura média interior das 7:00h e a exterior das 8:00h, ao final da simulação no PHOENICS, um valor médio de temperatura interior para o espaço, similar àquele reportado pelo EnergyPlus, para às 8:00h do dia 4 de Janeiro. E dessa forma, por relação transitiva, os modelos do PHOENICS foram validados fazendo uso do ANSI/ASHRAE Standard 140.

RESULTADOS

Os resultados obtidos da simulação do ano completo no software EnergyPlus 8.1 para os casos 600ff e 900ff e sua comparação com os dados pertencentes a outros softwares de simulação energética de edificações, são apresentados na tabela 6 e na figura 3.

A3-Tabela 6. Coeficientes superficiais interiores combinados

Caso BESTEST	600ff	900ff
Temp. Horária Anual Máxima. (°C)		
Mínima do Bestest	64.90	41.80
Máxima do Bestest	75.10	46.40
Média do Bestest	67.70	43.70
Modelo	64.82	43.98
Temp. Horária Anual Mínima (°C)		
Mínima do Bestest	-18.80	-6.40
Máxima do Bestest	-15.60	-1.60
Média do Bestest	-17.60	-3.70
Modelo	-17.66	-3.22
Temp. Horária Anual Média (°C)		
Mínima do Bestest	24.20	24.50
Máxima do Bestest	27.40	27.50
Média do Bestest	25.30	25.50
Modelo	25.37	25.62



A3-Figura 3. Temperaturas horarias do dia 4 de Janeiro, para os Casos 600ff e 900ff, calculadas pelo software EnergyPlus 8.1 e comparadas com as obtidas por outros softwares de Simulação energética de Edificações (Fonte: Adaptado de HENNINGER; WITTE, 2013)

De acordo com o ilustrado na figura 3 e os dados observados na tabela 6, os valores obtidos nas simulações dos casos 600ff e 900ff, estão contidos dentro dos limites estabelecidos pela norma. Com diferenças de 0.28°C com a temperatura máxima média do Bestest, de 0.48°C com a mínima e de 0.12°C com a temperatura média, pode-se concluir que as simulações feitas neste estudo com a ferramenta EnergyPlus cumprem com o standard 140-2007, e desta forma puderam ser usadas para continuar com a etapa dois do exercício.

Com base nos resultados anteriores, e seguindo o procedimento mencionado na metodologia, foram simulados os casos 600ff e 900ff. Uma vez finalizadas as simulações, foram tomadas as temperaturas de cada célula definida pela malha, e calculada a sua média. Os valores obtidos são apresentados a seguir na tabela 7.

A3-Tabela 7. Comparação de temperatura média interior entre EnergyPlus e PHOENICS para as 8:00h do dia 4 de Janeiro.

Caso	600ff	900ff
Temperatura Interna inicial (7:00h)	-17.31	-2.93
Temperatura exterior 8:00h	-23.67	-23.67
Temperatura interna 8:00h EnergyPlus	-17.66	-3.22
Temperatura interna 8:00h PHOENICS	-17.80	-5.06
Diferença entre softwares	0.14	1.84

Para ambos os casos, o PHOENICS apresentou uma média das temperaturas interiores menor do que os valores obtidos a través do EnergyPlus. Os valores encontrados por cada um dos softwares para o caso 600ff foram similares, com uma diferença de 0.14°C . Para o Caso 900ff, se observou uma diferença consideravelmente maior, de 1.84°C .

Da forma como está enunciado na norma, o caso 900ff possui uma estrutura de maior massa, tanto ao longo do dia e em geral do ano, sua temperatura interior está influenciada em maior medida pela inercia térmica de seus elementos. A modelagem da inercia térmica, como foi mencionado, é uma das limitações encontradas no código CFD com que foram modelados os casos, razão pela qual se obteve uma maior diferença entre as temperaturas interiores médias, calculadas por cada programa computacional, para este caso especificamente.

CONCLUSÕES

A ANSI/ASHRAE 140, apresenta uma série de casos, que através de uma modelagem relativamente simples, permitem avaliar vários aspectos da simulação termo-energética de edificações, como é o caso do EnergyPlus. No entanto, sua modelagem em códigos CFD, como PHOENICS, é difícil, precisando-se fazer uso de ferramentas complexas deste tipo de software.

Ao final do exercício foram obtidas temperaturas similares em ambos os softwares, apresentando-se uma diferença relativamente pequena para os valores de temperatura interna do caso 600ff. Diferença que é aumentada no caso 900ff, pela dificuldade encontrada para representar a influência da inercia térmica no valor da temperatura interior.

Este estudo de carácter exploratório obteve resultados interessantes, avaliando a possibilidade de usar a ANSI/ASHRAE 140 como uma ferramenta de validação para códigos CFD. No entanto, são necessários mais estudos nesta linha de investigação, que permitam fazer adaptações a esta norma, para diminuir a complexidade da modelagem para este tipo de software.

BIBLIOGRAFIA

ASHRAE STANDART PROJECT COMMITTEE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs** AtlantaASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., , 2007.

CAO, X. et al. Particle Image Velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications. **Energy and Buildings**, nov. 2013.

CHAM. **Encyclopaedia.** Disponível em:
<http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/encindex.htm>.

CROITORU, C. V. et al. **INNOVATIVE VENTILATED ENVELOPE ELEMENTS FOR SOLAR HEAT RECOVERY IN LOW ENERGY BUILDINGS.pdf**Building and Environment. **Anais...**Chambery, France: 2013

HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J. **EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI / ASHRAE Standard 140-2011.** Washington: [s.n.]. Disponível em:
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf>.

RAY, S. D. et al. Experimental Characterization of Full-Scale Naturally Ventilated Atrium and Validation of CFD Simulations. **Energy and Buildings**, nov. 2013.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Simulation Software.** Disponível em:
<<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>.

VAN HOOFF, T. et al. PIV measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: Ventilation by a free plane jet with Coanda effect. **Building and Environment**, v. 56, p. 301–313, out. 2012.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo - Projeto e Tecnologia do
Ambiente Construído, Departamento de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina,
como requisito para a obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier

Florianópolis, 2014